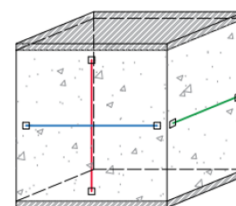
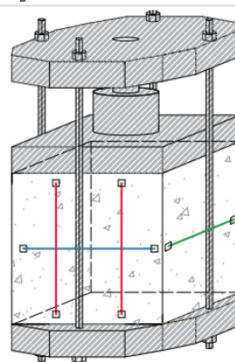
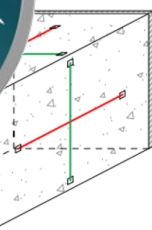
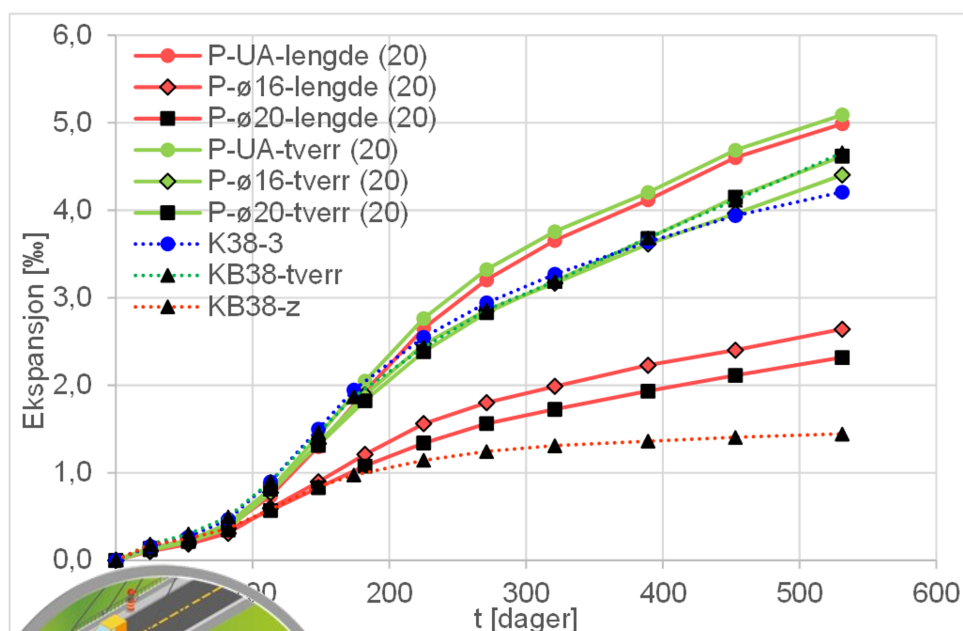


Effekter av AR-ekspansjon på frie, fastholdte og armerte prøver

Alkalireaksjoner i betong
FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017–2021

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 853



Tittel

Effekter av AR-ekspansjon på frie, fastholdte og armerte prøver

Undertittel

Alkalireaksjoner i betong. FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017–2021

Forfatter

Kathrine Mürer Stemland

Avdeling

Konstruksjoner

Seksjon

Konstruksjonsteknikk

Prosjektnummer

L10114

Rapportnummer

853

Prosjektleder

Bård M. Pedersen / Eva Rodum

Godkjent av

Eva Rodum

Emneord

betong, alkalireaksjoner, laboratorieforsøk, ekspansjon, fastholding, skadeparametere, SDT

Sammendrag

Rapporten presenterer resultater fra to laboratorieundersøkelser (fra hhv. 2019 og 2020) av alkalireaktiv betong ekspandert under akselererte betingelser (38°C, 100 % RF).

Undersøkelsene er utført på frie og enaksielt belastede 230 mm kuber, samt armerte og uarmerte 230x230x300 mm³ prismer.

Prøvene ble ekspandert til ulike ekspansjonsnivå (ca. 0,5, 1,0, 1,5 og > 3,0 ‰) før de ble testet for ulike skadeparametere og materialeegenskaper, både i frie og fastholdte retninger.

En bestemt testmetode, «Stiffness Damage Test» (SDT), ble primært brukt for å karakterisere skadegraden.

Undersøkelsene er en del av Kathrine Mürer Stemlands PhD ved NTNU.

Title

Effects of ASR-expansion on free, loaded and reinforced specimens

Subtitle

ASR in concrete. The R&D program Improved bridge maintenance 2017–2021

Author

Kathrine Mürer Stemland

Department

Structures

Section

Structural Engineering

Project number

L10114

Report number

853

Project manager

Bård M. Pedersen / Eva Rodum

Approved by

Eva Rodum

Key words

concrete, ASR, laboratory testing, expansion, restraint, damage parameters, SDT

Summary

The report presents results from two experimental investigations (from 2019 and 2020) of ASR-affected concrete expanded under accelerated conditions (38°C, 100 % RF).

The examinations are conducted on free and uniaxially loaded 230 mm cubes and reinforced and unreinforced 230x230x300 mm³ prisms.

The specimens were expanded to different expansion levels (about 0.5, 1.0, 1.5 and > 3.0 ‰) and tested for different parameters in multiple directions.

A particular mechanical test method, the “Stiffness damage test” (SDT), was primarily used to characterise the material degradation.

The investigations are part of Kathrine Mürer Stemland's PhD at NTNU.

INNHold

1.	INNLEDNING.....	5
2.	PRØVESTYKKER.....	8
2.1	Materialer og utstøping	8
2.1.1	Betong.....	8
2.1.2	Armering.....	9
2.2	Utforming, instrumentering og lagring	10
3.	PRØVINGSMETODIKK	15
3.1	Prøvingsplan.....	15
3.2	Ekspansjonsmålinger.....	18
3.3	Prøving av materialegenskaper	20
3.3.1	Stiffness Damage Test (SDT)	21
3.3.2	Arbeidsdiagram og test av trykkfasthet	23
4.	EKSPANSJONSMÅLINGER	24
4.1	Resultater og vurderinger av målinger	24
4.1.1	Kuber.....	24
4.1.2	Sylindre.....	31
4.1.3	Prismer.....	32
4.1.4	Ekspansjonshastighet	38
4.2	Virkning av trykkspenninger på ekspansjonen	42
4.2.1	Spenningsutvikling i armerte prismene.....	42
4.2.2	Vurdering av tøyningstilstanden i last/armeringsretningen til kubene og prismene.....	43
4.2.3	Vurdering av fri og fastholdt ekspansjon.....	46
5.	MATERIALEGENSKAPER.....	55
5.1	Resultater fra SDT.....	55
5.1.1	Stiffness Damage Index (SDI)	56
5.1.2	E-modul.....	65
5.1.3	PDI.....	69
5.1.4	NLI.....	69
5.1.5	Påvirkning av lastnivå på SDT	72
5.2	Resultater fra prøving av arbeidsdiagram og trykkfasthet	75
5.2.1	Trykkfasthet	77
5.2.2	Tøyning ved bruddspenning, ϵ_{peak}	79
5.2.3	E-modul ved 40 % av bruddspenning, E_{arb}	80
5.2.4	Trykkfasthet terninger.....	81

5.3	Påvirkning av frostsykler på SDT	83
6.	SAMMENDRAG OG KONKLUSJONER	86
	Referanser	91
	VEDLEGG A: ENKELTMÅLINGER EKSPANDERTE KUBER 2019	94
	A.1: Kube FC38-1 og RC38-1	94
	A.2: Kube FC38-2 og RC38-2	97
	A.3: Kube FC38-3 og RC38-3	100
	A.4: Kube FC38-4 og RC38-4	103
	A.5: Regelmessig målte kuber, FC38-5 og RC38-5.	106
	A-6: Fri ekspansjon.....	113
	VEDLEGG B: ENKELTMÅLINGER EKSPANDERTE KUBER 2020	114
	B.1: Gjennomsnittlig ekspansjon frie kuber	114
	B.2: Kube K38-1	116
	B.3: Kube K38-2	118
	B.4: Kube K38-3	120
	B.5: Kube KB38 (Belastet kube)	122
	B.6: Fri ekspansjon	126
	B.6: Bilder.....	128
	VEDLEGG C: ENKELTMÅLINGER PRISMER 2019	131
	C.1: Uarmerte prismer; P-UA-1 og P-UA 2	131
	C.2: Prismer med 4Ø10 mm stenger; P-Ø10-1 og P-Ø10-2	138
	C.3: Prismer med 4Ø16 mm stenger; P-Ø16-1 og P-Ø16-2	144
	C.4: Middelverdier.....	150
	C.5: Fri ekspansjon	153
	C.6: Bilder.....	154
	VEDLEGG D: ENKELTMÅLINGER PRISMER 2020	163
	D.1: Uarmert prisme; P-UA.....	163
	D.2: Prisme med 4Ø16 mm stenger; P-Ø16	169
	D.3: Prismer med 4Ø20 mm stenger; P-Ø20-1 og P-Ø20-2	174
	D.4: Middelverdier.....	183
	D.5: Fri ekspansjon	184
	D.6: Sammenligning med prismer fra 2019.....	185
	D.6: Bilder.....	190
	VEDLEGG E: ALLE EKSPANSJONSMÅLINGER	196
	E.1 Kuber	196
	E.2 Sylindere.....	198
	E.3 Prismer.....	199

VEDLEGG F: SDT RESULTATER	201
VEDLEGG G: RESULTATER ARBEIDSDIAGRAM OG TRYKKFASTHET	206
VEDLEGG H: PRØVING AV ARMERINGSSTÅL	212

1. INNLEDNING

Statens vegvesen har siden 2012 gjennomført to FoU-prosjekter relatert til effekten av alkalireaksjoner (AR) på bruer, innenfor hhv. Varige konstruksjoner (2012-2015) og Bedre bruvedlikehold (2017-2021). Hovedformålet med disse prosjektene har vært å; 1) Utvikle inspeksjonssystemer og -metoder, 2) forstå og utvikle modeller for lastvirkningene fra ekspansjonen på overbygningen av bruer og 3) undersøke mulige rehabiliteringstiltak. NTNU og SINTEF har hovedsakelig bidratt til punkt 2) knyttet til de konstruktive konsekvensene av AR. Dette notatet presenterer resultater fra forsøk knyttet til dette.

Alkalireaksjoner (AR) er en nedbrytningsmekanisme i betong som er forårsaket av en kjemisk reaksjon mellom alkali-reaktivt tilslag (SiO_2) og alkalier i porevannet i sementpastaen (Na^+ , K^+). Reaksjonsproduktet er en alkali-silika-gel som har stor evne til å oppta fuktighet. Utfellingen av gelen i tynne riss i tilslaget kan føre til et trykk i størrelsesorden 6-13 MPa som fører til at tilslagskornene risser opp og utvider seg, som beskrevet i Leemann et al. [1]. Rissene vil etter hvert også utvikle seg i sementpastaen. Opprissingen fører til en ekspansjon av betongen og nedbrytning av ulike materialegenskaper.

Det har så langt vært mest forskning knyttet til de indre kjemiske mekanismene ved alkalireaksjoner. Det er imidlertid også behov for å vite noe om hvordan materialegenskapene til betongen endrer seg med ekspansjonen hvis en skal gjøre en vurdering av en alkaliskadet konstruksjon. De egenskapene en vanligvis er mest opptatt av er trykkfasthet, E-modul og strekkfasthet. Strekkfastheten påvirker også indirekte skjær- og heftfastheten. Tidlig på 1990 foreslo *Institution of Structural Engineers* (ISE) [2] en sammenheng mellom ekspansjon og fastheter/E-modul, som vist i Tabell 1-1.

Tabell 1-1: Forslag til sammenheng mellom ekspansjon i ‰ (mm/m) og materialegenskaper for betong. Verdiene er ment som nedre grenseverdier i forhold til 28-døgns verdier for uskadet betong [2]

Egenskap	Ekspansjon [‰]				
	0,5	1,0	2,5	5,0	10,0
Trykkfasthet terning, $f_{c,cube}$	100	85	80	75	70
Enaksiell trykkfasthet, $f_{c,syl}$	95	80	60	60	-
Strekkfasthet (Spaltestrekk), $f_{ct,sp}$	85	75	55	40	-
E-modul, E_c	100	70	50	35	30

Hvis en ser litt bort fra strekkfastheten, så er det antatt å være en forholdsvis liten effekt av alkalireaksjoner opp til en ekspansjon på rundt 0,5 ‰. Effekten øker så gradvis, men det er først ved ekspansjoner opp mot 2,5 ‰ at det er en reduksjon av betydning. Denne tabellen er imidlertid forholdsvis "grov" og viser litt for mye verdier for ekspansjoner en sjelden har i vanlige konstruksjoner, i hvert fall i Norge. Det vanlige her er ekspansjoner i området 0,5 – 1,5

‰. Det er derfor materialegenskapene for ekspansjoner i det området som er av størst praktisk interesse.

Som blant annet beskrevet i [2] varierer gel formasjonen og ekspansjonsraten med ulike tilslag/silika, alkalier, temperatur og fuktforhold. Hvordan materialegenskapene påvirkes av AR er derfor materialavhengig. Denne rapporten omhandler laboratorieundersøkelser utført på en betong som er lik den benyttet på norske bruer/infrastruktur fra 1950- og 1960-tallet og resultatene er dermed antatt å være representative for disse konstruksjonene.

Ekspansjon av betongen vil gi tilleggskrefter på en statisk ubestemt konstruksjon, som beskrevet i Statens vegvesens rapport 601; «Alkalireaksjoner – veiledning til konstruktiv analyse» fra 2015 [3] og i Stemland et al [4]. For å bestemme denne lastvirkningen må størrelsen og fordelingen av ekspansjonen bestemmes så nøyaktig som mulig. Ekspansjonen er vanligvis ukjent i en eksisterende konstruksjon og er ikke nødvendigvis lik i alle retninger eller konstant med tiden. Både lokale variasjoner i materialsammensetning og fuktpåkjenning kan gi store utslag på reaksjonen og påvirker derfor ekspansjonsomfanget. Et viktig formål med dette arbeidet er derfor å forsøke å finne en relasjon mellom ekspansjonen og nedbrytningen av de materialegenskapene til betongen. I første omgang er dette arbeidet basert på akselererte laboratorieprøver (38°C, 100 % RF) av reaktiv betong. I det videre arbeidet blir det vurdert om resultatene for de akselererte prøvene også kan benyttes til å bestemme ekspansjonsnivået i eksisterende konstruksjoner basert på prøver av betongen. Dette er beskrevet i [5], med kjerneprøver fra Elgeseter bru.

Tidligere undersøkelser har vist lovende resultater ved å bestemme et skadenivå av en AR-påvirket betong både ved ikke-destruktiv og destruktiv testing. Denne undersøkelsen vil fokusere på en såkalt «Stiffness Damage Test» (SDT), som består av fem vekslinger med en trykkspenning opp til et spesifikt lastnivå. Forskjellen mellom på- og avlastingssyklusene vil skape en hysteres som direkte kan relateres til mikrooppripping av betongen. Fra denne testen kan flere skadeparametere bestemmes og videre relateres til en ekspansjon. Noe av utfordringen med denne relasjonen er imidlertid at den vil kunne variere med ulike typer tilslag og betongresepter (fastheter), som vist i [32].

I en armert betongkonstruksjon, er det kun betongen som ekspanderer på grunn av AR og ikke armeringen. Heften mellom armeringen og betongen vil imidlertid tvinge armeringen til å følge betongens ekspansjon. Dette vil gi initiale eller tilleggs strekkspenninger i armeringen og korresponderende trykkspenninger i betongen i armeringsretningen.

Det er tidligere utført flere undersøkelser som har sett på hvordan fastholding (trykkspenning) i en retning påvirker ekspansjonen i denne og de andre retningene [2, 7-14]. Fastholdingen kan enten være i form av ytre krefter på konstruksjonen eller som indre spenninger fra armeringen. Generelt gir høyere trykkspenninger større reduksjoner av ekspansjonen. Dette er imidlertid også en effekt som vil være materialavhengig. Noe av de tidligere forsøkene har vist opptil 70-80 % reduksjon av ekspansjonen for relativt lave spenningsnivåer (3-5 MPa). Det er derfor viktig å kjenne denne effekten for eksisterende konstruksjoner hvor armeringen kan gi spenninger av dette størrelsesnivået i de mest armerte retningene. Effekten av fastholding på ekspansjonen er derfor inkludert som en viktig del av denne testserien.

Denne rapporten presenterer resultater fra to omfattende eksperimentelle undersøkelser av akselererte laboratorieprøver (38 °C, 100 % RF) av reaktiv betong. Undersøkelsene består både av frie- og enaksielt belastede kuber i tillegg til armerte og uarmerte prizmer. En serie med prøver ble støpt i 2019 og en oppfølgende serie ble støpt i 2020. Undersøkelsene etterfølger tidligere arbeid rapportert av Kongshaug et al. [14], men med supplerende prøver og endrede lagringsbetingelser (fra 60 °C to 38 °C). Prøvene blir ekspandert til ulike ekspansjonsnivå og testet for materialeegenskaper ved hjelp av SDT og prøving av arbeidsdiagram og trykkfasthet. Ekspansjonene til prøvestykkene blir regelmessig målt i ulike retninger for å undersøke påvirkningen de ulike typene av fastholding har på ekspansjonen. Undersøkelsen har som mål å gi en bedre forståelse for oppførselen til en AR-påvirket betong for å utføre en mer pålitelig vurdering og konstruktiv analyse av eksisterende konstruksjoner påvirket av AR. Prøvene fra 2020 er støpt samtidig som og med samme betongresept som større armerte bjelker, som er beskrevet i Statens Vegvesen Rapport 854 «*Skjærforsøk av AR-ekspanderte bjelker – Alkalireaksjoner i betong*» [15]. Innholdet i denne rapporten og i Rapport 854 er også beskrevet i doktorgradsavhandlingen til Kathrine Mürer Stemland [16].

2. PRØVESTYKKER

Prøveserien fra 2019 bestod av 15 stk. 230 mm kuber, 10 stk. Ø150x300 mm sylindere og 27 stk. 100 mm terninger. I tillegg ble det støpt 6 stk. 230x230x300 mm prizmer; derav 2 stk. uarmerte, 2 stk. med 4Ø10 mm stenger (0,6 % armering) og 2 stk. med 4Ø16 mm stenger (1,5 % armering).

Prøvene utstøpt i 2020 repeterer undersøkelsene gjort i prøveserien fra 2019 med noen justerte prøver og med en litt annen resept, se tabell 2-1. Den består av 4 stk. 230x230x300 mm prizmer; 1 stk. uarmert, 1 stk. med 4Ø16 mm stenger (1,5 % armering) og 2 stk. med 4Ø20 mm stenger (2,4 % armering) og 6 stk. 230 mm kuber.

2.1 Materialer og utstøping

2.1.1 Betong

Betongresepten som ble brukt i 2019-serien er den samme som ble benyttet ved tidligere AR forsøk ved NTNU og SINTEF, med alkali-reaktivt grovt tilslag (Ottersbro 4-16 mm), ikke-reaktiv sand (Årdal 0-4 mm), Norcem industri sement (CEM I), v/c-tall på 0,47 og alkali-innhold på 5,6 kg Na₂O_{eq}/m³. Betongen er antatt å være representativ for en del norske bruer bygd på 1950 -60 tallet. Resepten er tidligere dokumentert ved akselerert AR-testing [17].

Prøvene i 2019-serien hadde en gjennomsnittlig 28-døgnsfasthet, $f_{cm,28}$ lik 67,6 MPa som tilsvarende ca. 54 MPa i sylindrefasthet. Dette ble ansett som noe høyt, det var derfor ønskelig å oppnå en noe lavere fasthet i den oppfølgende serien. Den oppfølgende serien ble støpt samtidig som bjelker benyttet til skjærforsøk. Den lavere fastheten var derfor ønskelig hovedsakelig med tanke på bjelkene, men det var også interessant å se hvordan dette påvirket forsøkene som ble repetert fra 2019. Betongresepten fra 2020 har derfor et høyere v/c-tall (0,54), men er ellers lik. Gjennomsnittlig 28-døgns sylindere- og terningfasthet ble for betongresepten benyttet i 2020 testet til henholdsvis 43,2 og 52,2 MPa. Betongreseptene er gitt i tabell 2-1. Dato for utstøping for første prøveserie (i rapporten kalt 2019-serien) var 18. og 19. desember 2018, mens det for den andre (2020-serien) var 29. juni og 01. juli 2020. Alle prøvene fra begge serier ble lagret fuktig under striesekker og plast (RF $\approx$ 100 %) ved ca. 20 °C under herdeperioden. Støperetningen til prøvene blir definert som x-retning.

Tabell 2-1: Betongresepter for laboratorieseriene fra 2019 og 2020

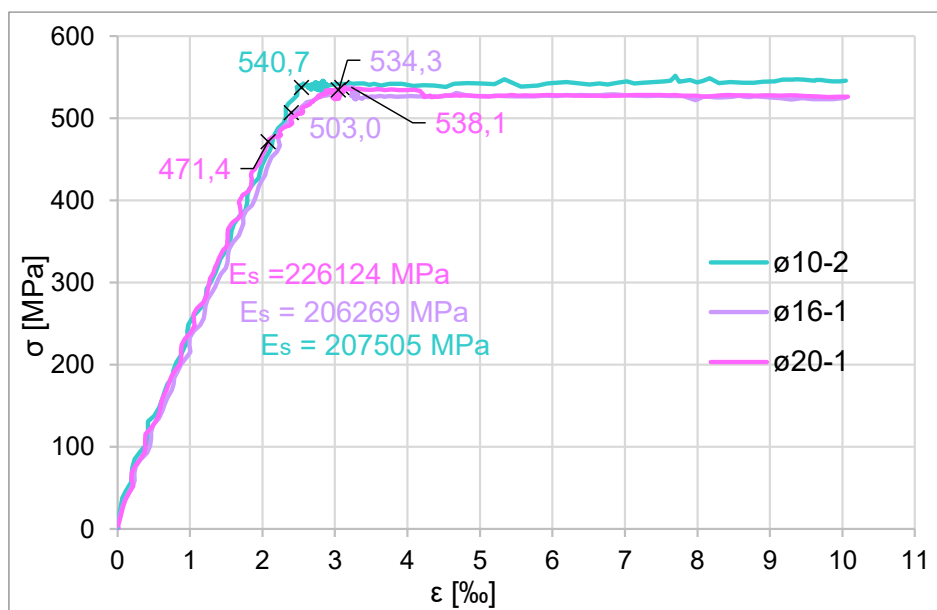
	2019-serien	2020-serien
	Mengde [kg/m ³]	Mengde [kg/m ³]
Norcem Industri, CEM I	457	451
Årdal sand 0-4 mm	667 (tørrvekt)	657 (tørrvekt)
Ottersbo 4-8 mm	172 (tørrvekt)	168 (tørrvekt)
Ottersbo 8-11 mm	518 (tørrvekt)	504 (tørrvekt)
Ottersbo 11-16 mm	345 (tørrvekt)	336 (tørrvekt)
Superplasticizer Sika FB-2	1,4	1,4
Vann	217	244
Alkali-innhold, Na ₂ O _{eq}	5,6	5,6
v/c	0,47	0,54

2.1.2 Armering

Det ble benyttet stål av kvalitet B500NC. Armeringsstenger på Ø10, Ø16 og Ø20 mm ble strekktestet ved SINTEF i henhold til EN ISO 6892-1. Det ble testet to stenger av hver diameter. Alle resultater og lastprosedyre er vist i Vedlegg H. Gjennomsnittlig flytespenning, flytetøyning og E-modul er vist i tabell 2-2, mens figur 2-1 viser spennings-tøyningskurvene til en stang av hver dimensjon. Som kurvene viser, har armeringen et tydelig flyteplatå. Stengene på 10 mm oppfører seg elastisk helt til flytplateået er nådd, mens stengene med større diameter bøyer av fra elastisk område litt før flytning. Figuren viser også beregnet E-modul fra det elastiske området og spenningen ved slutten på det elastiske området. I fortsettelsen er imidlertid en E-modul på 200000 MPa benyttet for alle diameterne da forskjellene også kan komme fra måleunøyaktigheter. Flytespenningen og flytetøyningen er bestemt fra kurvenes toppunkt.

Tabell 2-2: Resultater fra prøving av armeringsstål

Prøve	f _y [MPa]	ε _y [‰]	E _s [MPa]
Ø10	544,3	2,98	207505
Ø16	536,2	3,11	210559
Ø20	532,2	3,06	218114

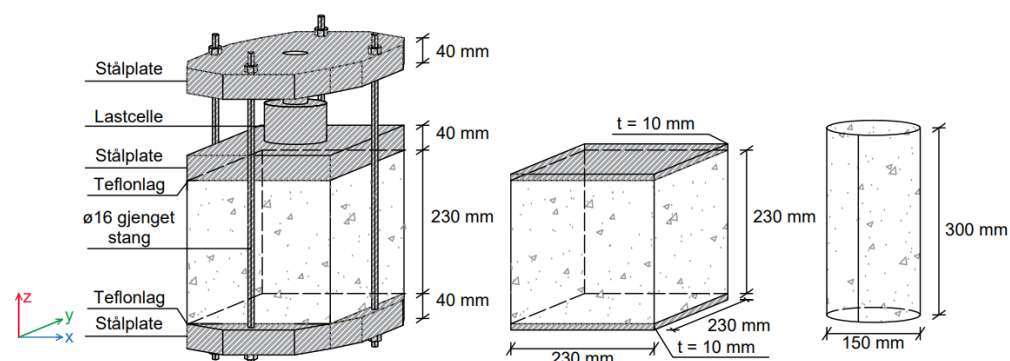


Figur 2-1: Spennings-tøyningskurve av en Ø10, Ø16 og Ø20 mm stang

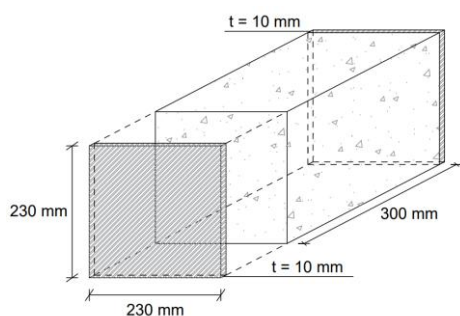
2.2 Utforming, instrumentering og lagring

Fem av kubene fra prøveserien i 2019 og en av kubene fra 2020 ble belastet i en retning, som er definert som z-retningen, av et lastsystem med lastcelle som gir en trykkspenning på 3 MPa under hele lagringen/ekspanderingen. Lastsystemet er likt som beskrevet i Kongshaug et al. [14] og er illustrert i figur 2-2 og vist i figur 2-5a). Disse prøvene har 40 mm tykke stålplater på endeflatene i z-retningen som er holdt sammen av fire Ø16 mm gjengede stenger. En lastcelle er plassert mellom topplaten og en 40 mm tykk stålplate plassert på toppen av kubene for å måle lasten. For å redusere friksjonen ble det også plassert et teflonlag mellom betongen og stålplatene som dermed hindrer fastholding sideveis. Lasten ble påført kubene ved å stramme de gjengede stengene. Resten av kubene har ikke belastning. De frie kubene har likevel 10 mm stålplater pålimt på to motstående sideflater slik at fuktforholdene er like for de fastholdte og de frie prøvene under forsøkene, som vist i figur 2-2 og 2-5b).

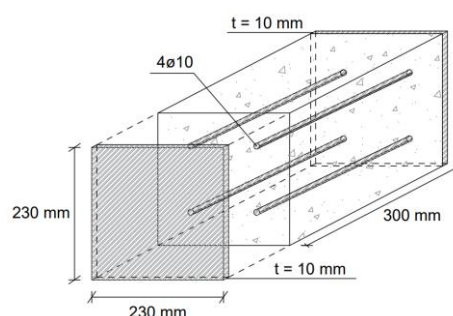
Armeringsstengene i de armerte prismene ble sveiset fast til stålplater med tykkelse 10- og 15 mm (for prismene med Ø20 mm stenger) ved endeflatene. Figur 2-3 viser mål og beskrivelse av de ulike prismene, mens figur 2-5c) viser formene før utstøping. Armeringsplasseringen er vist i figur 2-4. Stålplatene vil gi en viss fastholdning i tverretningen i endene på disse prøvene. Denne effekten er likevel vurdert til å være forholdsvis liten i midtområdet til prismene, der ekspansjonen måles. For å se nærmere på dette forholdet ble likevel ekspansjonen målt i endområdet på prismene støpt i 2020. De uarmerte prismene har også stålplater på de to endeflatene. Disse er støpt fast til prøvestykket ved hjelp av armeringsjern som bare går et lite stykke (ca. 50 mm) inn i betongen.



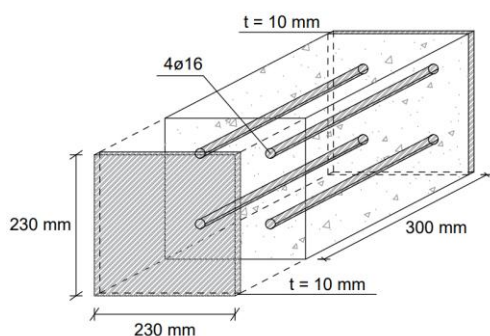
Figur 2-2: Mål og beskrivelse av lastsystem på belastede 230 mm kuber, frie 230 mm kuber og Ø150x300 mm sylindere



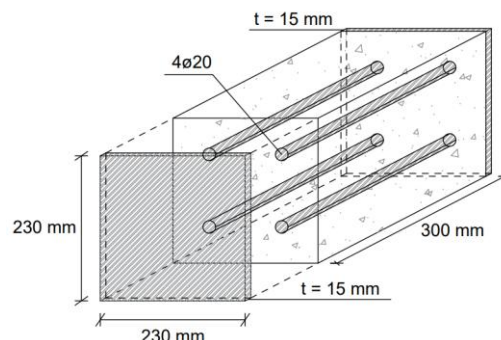
a) Uarmert prisme



b) Prisme med 4Ø10 mm stenger (0,6 % armering)

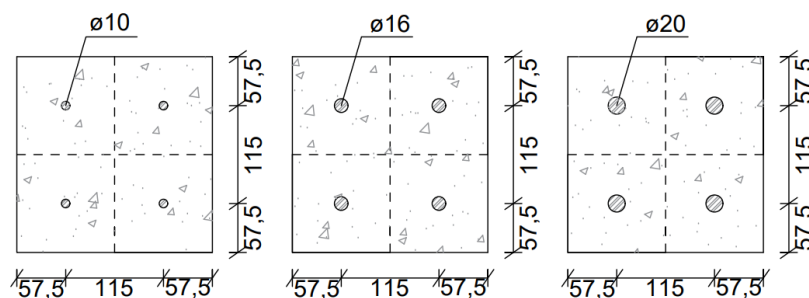


c) Prisme med 4Ø16 mm stenger (1,5 % armering)



d) Prisme med 4Ø20 mm stenger (2,4 % armering)

Figur 2-3: Mål og beskrivelse av armerte- og uarmerte prismer



a) 4Ø10 mm stenger b) 4Ø16 mm stenger c) 4Ø20 mm stenger

Figur 2-4: Armeringsplassering armerte prismer, mål gitt i mm til senter armering



a) Last-system for belastede prøver (Foto: Jonas Kirkhaug [18])



b) Stålplater på ubelastede prøver (Foto: Jonas Kirkhaug [18])



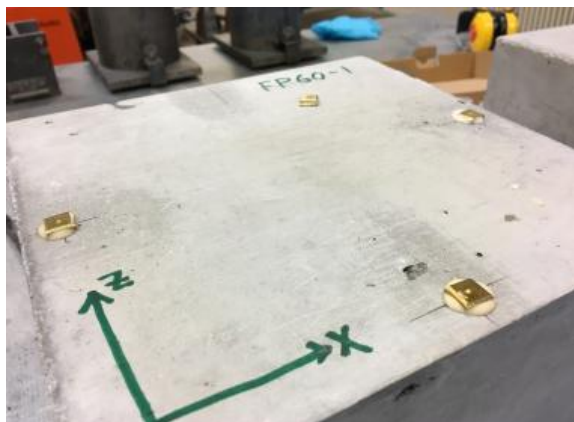
c) Forankringsplater og armering på prismer (2020)

Figur 2-5: Bilder av de ulike prøvestykkene

For å måle ekspansjonen til prøvene i ulike retninger ble alle prøver instrumentert med målepunkt/knaster. For alle kuber er det benyttet bored $\varnothing 1$ mm hull i messingplater ($<10 \times 10$ mm) som ble limt direkte på overflaten, vist i figur 2-6a). Målepunktene ble limt i en avstand på 200 mm sentrert midt på sideflatene. For $\varnothing 150 \times 300$ mm sylindrene er målepunktene festet midt i hver endeflate for måling i lengderetningen. Her er det brukt messingbolter ($\varnothing 8 \times 15$ mm) som det først ble boret et $\varnothing 10$ mm hull til og som boltene ble limt i, vist i figur 2-6b). Målepunktene for måling diametralt er limt på midten rett overfor hverandre, her er det brukt de samme pålimte messingplatene som for kubene. For prismene fra 2019 er målepunktene i retningen parallelt med armeringen/lengderetningen (sidene på 300 mm) tilsvarende messingbolter som for sylindrene i lengderetning. I retningen tvers på armeringen (sider på 230 mm) er det derimot benyttet samme type målepunkt som for kubene. På prøvene fra 2020 er det kun benyttet pålimte messingplater, da erfaringen var at målingene er like gode uavhengig av festemetoden og at boring av hull før festing av bolter var mye mer tidkrevende. Det kan likevel forekomme at noen av de pålimte lappene faller av under måling/behandlingen av prøvestykkene. Limet som ble brukt er et to komponent lim av typen X-60. Før messingplatene ble limt ble kontaktpunktet pusset og gjort rent ved trykkluft.

Alle prøvene ble plassert i tette plastbøtter/containere for å oppnå tilnærmet 100 % RF. Bøttene ble fylt med vann i bunnen og prøvene ble plassert på rister over vannspeilet for å ikke være i direkte kontakt med vannet. Langs veggene på bøttene ble det i hele høyden festet frotté-stoff for å sørge for jevne fuktforhold i hele bøtten. Lagringsmetoden er beskrevet i NB32 [19] og en RF i bøttene opp mot 100 % ble målt som del i PhD-avhandlingen til Jan Lindgård [20]. Bøttene er vist i figur 2-7. Bøttene med prøver som skulle ekspandere, ble lagret i rom med lufttemperatur på 38°C under ekspansjonen. I tillegg ble noen bøtter med kuber uten belastning og noen sylindre lagret ved 20°C som «uskadde» referanser (reaksjonen blir for treg til at det vil skje noe særlig i løpet av forsøket).

En fri kube fra serien i 2019 ble lagret i en container med temperatur 60 °C for å kunne verifisere resultatene fra denne prøveserien opp mot det som ble gjort av Kongshaug et al. [14] hvor tilsvarende ekspanderte kuber var lagret ved 60 °C.



a) Målepunkter av messinglapper limt på overflaten



b) Målepunkter av messingbolter limt i borede hull

Figur 2-6: Typer målepunkt (Foto: Jonas Kirkhaug [18])



Figur 2-7: Bøtter som holder 100 % RF benyttet til lagring av prøvestykker (Foto: Jonas Kirkhaug [18])

Alle prøver ble lagret fuktig ved 20 °C til de fikk en alder på 28 døgn før de ble instrumentert. Alle kubene og sylindrerne fra 2019 som skulle ekspandere, ble så satt inn i 38 °C-rommet (og 60 °C-containeren) ved en alder på 37 døgn (den 24/01/19). På grunn av en mer tidkrevende instrumentering og noen administrative problemer med bruk av lim i lab ble de armerte og uarmerte prismene fra 2019 først satt inn i 38 °C-rommet for ekspansjon ved en alder på 73 døgn (01/03/19). Prøvene støpt i 2020 ble satt inn i 38 °C-rommet ved en alder på 85 døgn (24/09/20).

Noen strekkklapper ble også montert på en fri og en belastet kube fra 2019-serien (FC38-5 og RC38-5), som en alternativ metode for å måle ekspansjon. Disse viste seg å gi ganske

upålitelige resultater og er derfor ikke beskrevet noe nærmere. Masteroppgaven til Jonas Kirkhaug [18] har diskutert disse resultatene kort.

Tabell 2-3 og 2-4 viser oversikt, merking/prøvenavn, belastning/armering og lagring for prøvestykker støpt i 2019 og 2020.

Tabell 2-3: Oversikt og merking av prøvestykker støpt i 2019

Merking (1)	Antall	Størrelse	Belastning/ Armering	Temperatur [°C]	RF
FC38	5	(230 mm) ³	Fri	38	~100%
RC38	5	(230 mm) ³	3 MPa	38	~100%
FC20	4	(230 mm) ³	Fri	20	~100%
FC60	1	(230 mm) ³	Fri	60	~100%
S38	6	Ø150x300 mm	Fri	38	~100%
S20	4	Ø150x300 mm	Fri	20	~100%
P-UA	2	(230x230x300 mm)	Fri	38	~100%
P-Ø10	2	(230x230x300 mm)	4Ø10 mm	38	~100%
P-Ø16	2	(230x230x300 mm)	4Ø16 mm	38	~100%

(1) FC = Ubelastet/fri kube, RC = Kube, enaksielt belastet (3 MPa), S = Sylinder, P = Prisme, UA = Uarmert, Ø10 = 4 Ø10 mm stenger, Ø16 = 4 Ø16 mm stenger, 20/38/60 = eksponeringstemperatur [°C]

Tabell 2-4: Oversikt og merking av prøvestykker støpt i 2020

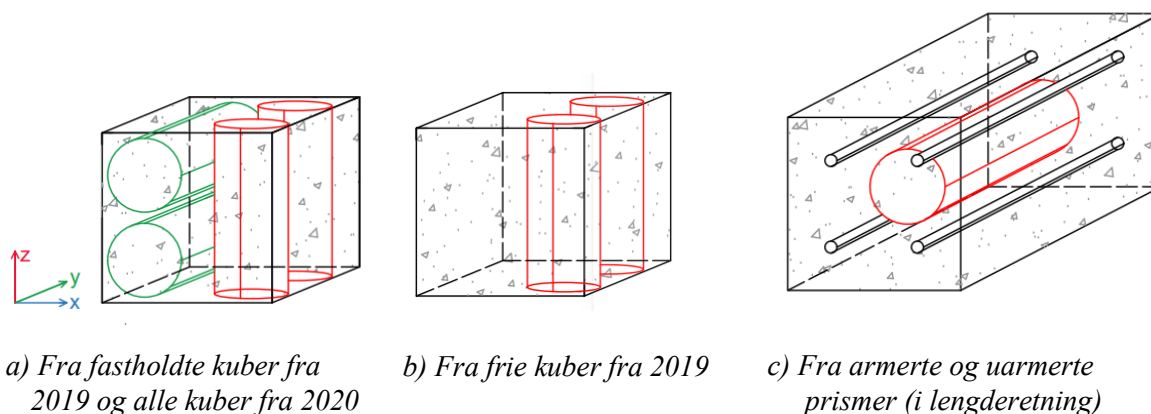
Merking (1)	Antal l	Størrelse	Belastning/ Armering	Temperatu r [°C]	RF
K20	2	(230 mm) ³	Fri	20	~100%
K38	4	(230 mm) ³	Fri	38	~100%
KB38	1	(230 mm) ³	3MPa	38	~100%
P-UA	1	(230x230x300 mm)	Fri	38	~100%
P-Ø16	1	(230x230x300 mm)	4Ø16 mm	38	~100%
P-Ø20	2	(230x230x300 mm)	4Ø20 mm	38	~100%

(1) K = Ubelastet/fri kube, KB = Kube, enaksielt belastet (3 MPa), P = Prisme, UA = Uarmert, Ø10 = 4Ø10 mm stenger, Ø16 = 4Ø16 mm stenger, 20/38 = eksponeringstemperatur [°C]

3. PRØVINGSMETODIKK

3.1 Prøvingsplan

De ulike prøvene ble ekspandert til ulike ekspansjonsnivå før de ble testet for materialeegenskaper. Forsøkene skal både undersøke ekspansjonsforløpet for de ulike prøvestykkene og materialeegenskaper/skadeparametere ved ulike ekspansjonsnivå. En prøvemethode kalt «Stiffness damage test» (SDT) ble hovedsakelig benyttet til testing av ulike skadeparametere og materialeegenskaper, i tillegg til prøving av arbeidsdiagram og laststyrt prøving av trykkfasthet. Prøvingen ble utført på sylindre, henholdsvis Ø95x190 mm sylindere boret ut fra kubene og prismene (se figur 3-1) og Ø150x300 mm støpte sylindre direkte. En nærmere beskrivelse av testmetodene er gitt i avsnitt 3.3.



Figur 3-1: Borede Ø95x200 mm prøvesylindere fra ulike prøver

For kubene fra 2019 ble prøvesylindere fra en ekspandert fri kube, en ekspandert belastet kube og en referanse kube testet for SDT ved fire ulike tidspunkt/terminer. Disse tidspunktene er basert på ekspansjonsnivået til de frie kubene og er ved ca. 0,5, 1,5, 2,5 og 4 ‰ (mm/m) ekspansjon. Fra de frie prøvene ble det boret to prøvesylindere i samme retning (z-retning) og fra de belastede to prøver i belastet retning (z-retning) og to prøver i fri retning (y-retning), som vist i figur 3-1a) og b). I tillegg til kubene benyttet til SDT ved de fire terminene var det også lagret en ekstra fri og en ekstra belastet kube ved 38 °C (FC38-5 og RC38-5). Disse kubene ble først og fremst benyttet til regelmessig måling av ekspansjonen. På slutten av prøvingsperioden ble imidlertid prøvesylindere fra disse kubene testet på tilsvarende måte som for de andre kubene. Ekspansjonsnivået på disse kubene var da omtrent tilsvarende som for kubene ved fjerde termin.

Sylindrene på Ø150x300 fra 2019 ble testet for SDT ved de samme ekspansjonsnivåene/terminene som kubene, med unntak av første nivå. Referansene (prøver lagret ved 20 °C) til disse prøvene ble kun testet ved første og siste termin. Hensikten med disse sylindrene var å se om det var noen forskjell i utviklingen av ekspansjonen og materialeegenskapene til disse større støpte prøvene i forhold til sylindrene boret ut fra kubene.

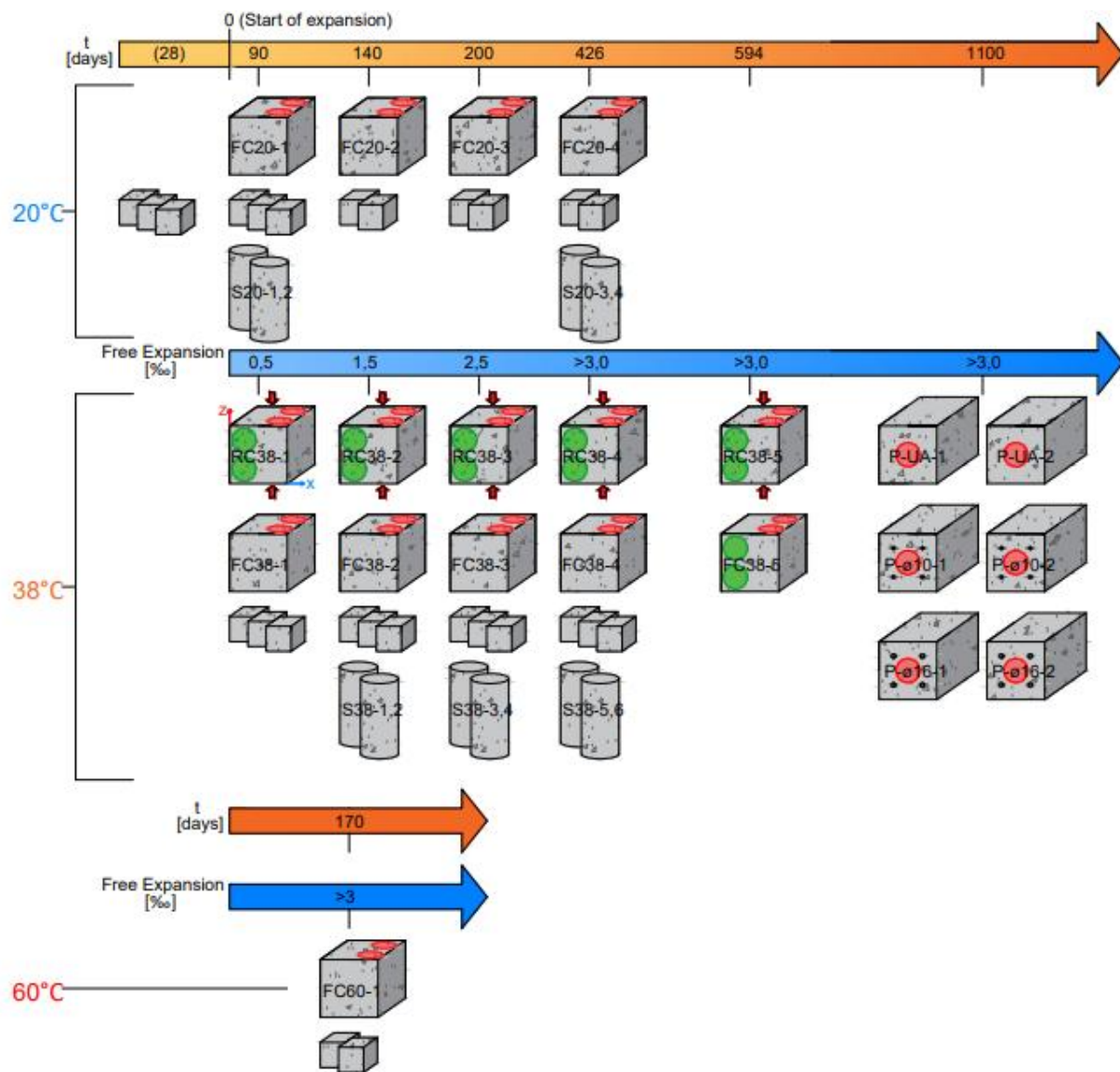
For 2020-kubene ble sylindere boret fra de ekspanderte frie kubene prøvd for SDT ved en ekspansjon på henholdsvis 1,0 og 1,5 ‰. En siste ekspandert fri kube og den belastede kubene (K38-3 og KB38) ble beholdt til ekspansjonsnivået i de frie retningene oversteg 3 ‰ for å

kunne følge ekspansjonsutviklingen over tid. Deretter ble prøvesylindere fra disse prøvene også testet. Prøvesylindere fra referansekubene lagret ved 20 °C ble testet ved første- og siste ekspansjonsnivå. Fra alle kubene ble det boret ut fire prøver; 2 stk. i z-retning (belastet retning for den belastede kuben) og 2 stk. i y-retning som vist i figur 3-1a). Alle sylindrene fra den belastede kuben og halvparten fra de frie kubene ble benyttet til SDT. En av sylindrene fra z-retningen til noen av de frie kubene (K20-1, K38-1, K38-2) ble imidlertid utsatt for noen frostsykler før SDT-testingen. Dette gjelder også en sylinder fra z-retningen til den siste fri kuben fra 2019 (FC38-5). Tvilling-prøvene ble testet for SDT uten frostsykler som referanser. Sylindrene fra y-retningen til den siste kuben som var lagret på 20 °C (K20-2) ble prøvd laststyrt til brudd, mens sylindrene fra den siste ekspanderte frie kuben (K38-3) ble prøvd for SDT med et høyere og et lavere lastnivå enn de andre prøvene for å undersøke effekten av lastnivå på resultatene.

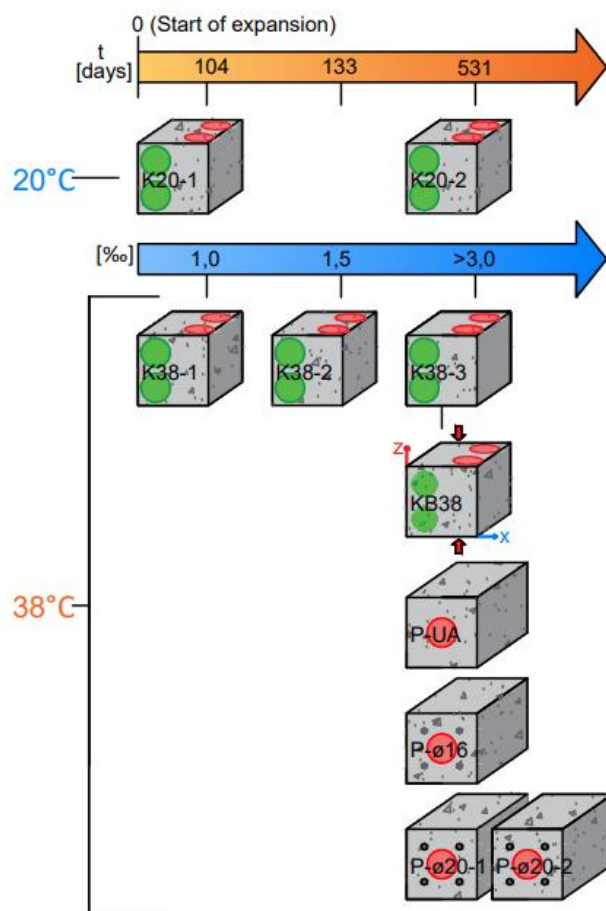
Hensikten med de armerte og uarmerte prismene var først og fremst å følge ekspansjonsutviklingen i armeringsretningen og på tvers av denne retningen. Videre kan disse resultatene sammenlignes med resultatene fra de frie og fastholdte kubene for å se på forskjeller i ekspansjonsforløp mellom betong utsatt for konstant trykkspenning og betong hvor trykkspenningen gradvis bygges opp pga. armering. Det er også boret ut prøvesylindere fra disse prismene i armeringsretningen ved slutten av prøvingstiden som ble benyttet til SDT. Det var kun mulig å få ut en slik prøve fra hvert prisme som vist i figur 3-1c).

Ved hver termin for 2019-kubene testes også 100 mm terninger for trykkfasthet. Disse terningene er lagret sammen med de frie kubene både ved 20 °C, 38 °C, og 60 °C. I tillegg ble det testet tre terninger som ble lagret i vann ved 20 °C for å bestemme 28-døgns fastheten til betongen. Oppførselen til 100 mm terninger lagret ved høye temperaturer blir sett på som usikre og lite relevant, dette ble derfor ikke repetert for prøvene i 2020. Fra dette laboratorieprogrammet ble derimot et større antall Ø100x200 mm sylindere og 100 mm terninger støpt og lagret i vannbad ved 20 °C og trykktestet ved ulike tidspunkt. Dette ble gjort først og fremst for å holde oversikt over fasthetsutviklingen til betongen med hensyn til bjelkeforsøkene, og resultatene blir dermed rapportert i Rapport 854 [15].

Figur 3-2 og 3-3 viser en detaljert oversikt over prøver, borede sylindere og ved hvilket tidspunkt og ekspansjon disse testes.



Figur 3-2: Oversikt over prøver, borede sylindre og prøvingsterminer for kuber, sylindere, terninger og armerte og uarmerte prismer fra 2019



Figur 3-3: Oversikt over prøver, borede sylindere og prøvingsterminer for kuber og prizmer fra 2020

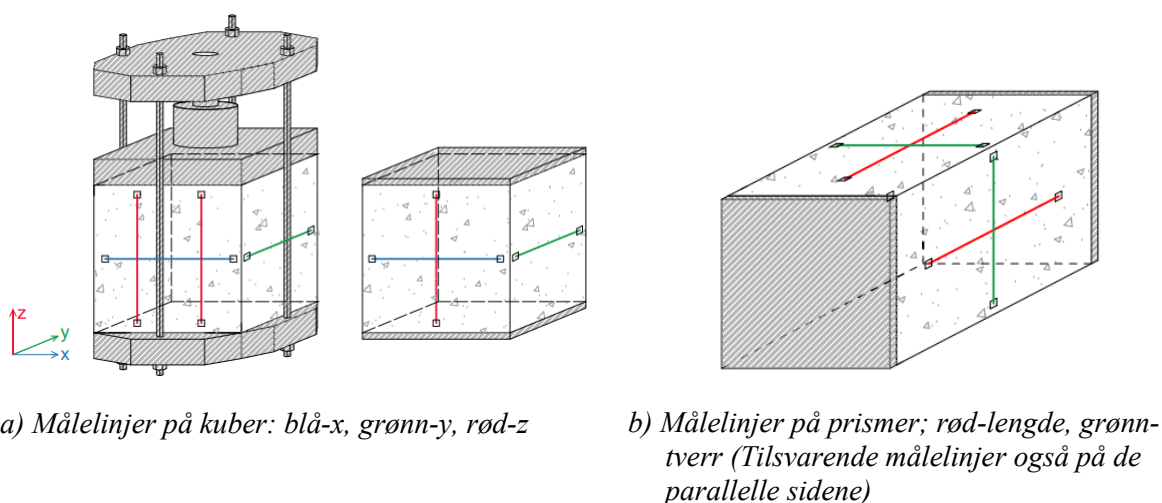
3.2 Ekspansjonsmålinger

Ekspansjonen til kubene ble målt på overflatene langs 200 mm lange målelinjer. Det ble målt i x-, y- og z-retning, hvor x er definert som støperetningen og z er definert som lastretningen for de belastede kubene. Kubene støpt i 2019 hadde målelinjer på én flate pr. retning som vist i figur 3-4a). På kubene støpt i 2020 ble det derimot besluttet å ha målelinjer på alle ledige sideflater, to målelinjer pr. x- og y- retning og fire målinger i z-retning (åtte for den belastede), som vist i figur 3-5 a). Målelinjene ble i utgangspunktet sentrert midt på flatene. De belastede kubene har imidlertid to målelinjer i z-retning (langs ¼-dels linjene) pr. målte flate på grunn av boltene som er midt på flatene i denne retningen. Ekspansjonen i z-retningen for en sideflate beregnes her som middelverdien av disse to målingene.

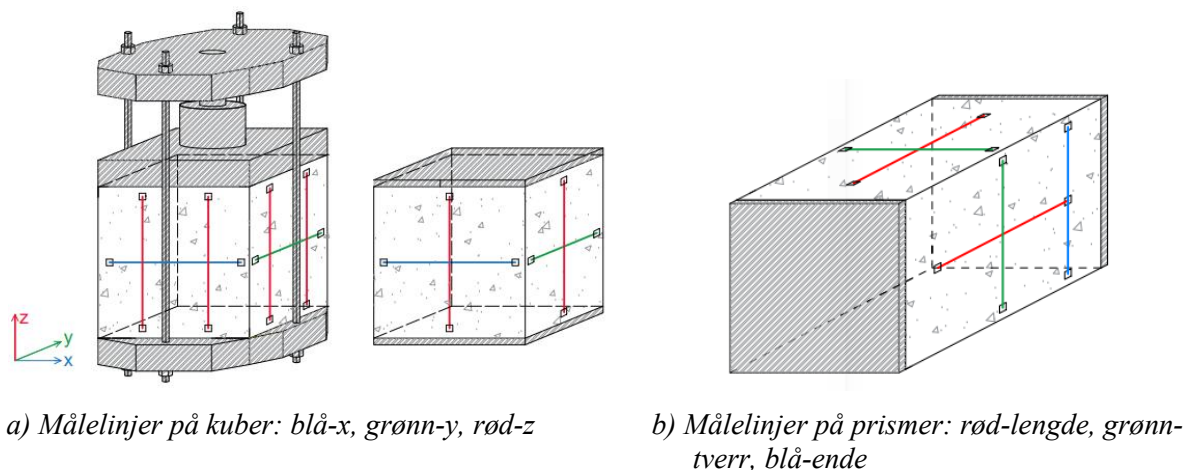
Ekspansjonene til to av kubene fra 2019, en fri og en belastet (FC38-5 og RC38-5), ble målt regelmessig gjennom hele testperioden. Dette ble gjort både for å følge utviklingen av ekspansjonen og for å få en indikasjon på når de forhåndsbestemte ekspansjonsnivåene for de andre kubene var oppnådd. Kuben lagret ved 60 °C (FC60) ble også målt regelmessig. Alle disse tre kubene hadde derfor dobbelt opp med målelinjer; to målelinjer i hver retning (fire i z-retning for RC38-5). De andre kubene, som har en målelinje i hver retning, måles kun før ekspansjonen avsluttes og det skal bores ut prøvesylindere. På grunn av at det kun var 6 stk. kuber fra 2020, ble alle disse målt regelmessig.

De armerte og uarmerte prismene har målelinjer på 200 mm parallelt med og tvers på armeringsretningen på alle fire sideflatene, se figur 3-4b). Disse målelinjene er sentrert midt på overflatene i begge retningene. På to av sideflatene til prismene fra 2020 er det i tillegg målelinjer på tvers av armerings-retningen 50 mm fra prøvestykkets ende for å undersøke effekten av fastholdingen fra stålplatene (blå linje figur 3-5 b)). Hensikten med prismene er først og fremst å undersøke effekten armeringen på ekspansjonen i de ulike retningene og ekspansjonen ble derfor målt regelmessig gjennom hele prøveperioden.

Ø150x300 mm sylindrene ble målt i lengderetning fra hver endeflate og diametralt. Sylindrene som ble beholdt til siste termin (S38-5, S38-6, S20-3 og S20-4) ble målt regelmessig, mens de andre ble målt kun før endt ekspansjon og SDT-testing.



Figur 3-4: Målelinjer på prøver fra 2019



Figur 3-5: Målelinjer på prøver fra 2020 (Tilsvarende målelinjer også på de parallelle sidene)

Alle prøvestykkene ble først målt ved 20 °C som en referanse. Etter at de var satt inn i 38 °C-rommet (60 °C for FC60) ble de målt på nytt etter 24 timer. Dette ble gjort både for å få med den første temperaturutvidelsen og for å få referanse til de senere regelmessige målingene som gjøres uten at prøvestykkene kjøles ned. Tilsvarende uttak av prøvestykkene fra 38 °C-rommet før testing måles alle prøvestykkene først ved 38 °C før de kjøles ned til 20 °C og måles på nytt.

De belastede kubene ble først lastet til en forlast på 10 kN før de ble satt inn i 38 °C-rommet. Lasten ble deretter økt til den tilsiktede spenningen på 3 MPa etter at kubene hadde en stabil temperatur. Disse kubene ble målt ved 20 °C før innsetting i lastriggen, ved 38 °C før stramming av boltene og ved 38 °C etter stramming av boltene for å få et mål på både temperaturen og den elastiske deformasjonen. Samme prosedyre ble fulgt ved uttak av disse prøvene.

Ekspansjonen til både prismene og kubene er målt med et digitalt DEMEC ekstensometer med måleenhet ned til 0,001 mm. Ekstensometeret er vist i figur 3-6a). Dette gir en teoretisk målenøyaktighet på $0,005 \cdot E^{-3}$. De målte verdiene skal ganges med en faktor på 0,8 for å bestemme de virkelige tøyningene. Denne korreksjonen skyldes forskjellig lengde til uret og til målepunktet for pendelarmen. Unntaket er i x- og y-retning til prøvestykkene med lastcelle hvor en ikke kom til med det digitale ekstensometeret og måtte bruke et analogt ekstensometer (med urskive og viser). Måleenheten på denne urskiven er 0,002 mm, som for en målelengde på 200 mm gir en målenøyaktighet på $0,01 \cdot E^{-3}$. Prøvestykkene med lastcelle ble målt med begge ekstensometer typene før de ble satt inn og etter at de var blitt tatt ut av riggen. Disse målingene viste godt samsvar mellom de to typene. Ø150x300 mm sylindrene ble målt med bue-formede Mitutoyo ekstensometer både i diametral og langsgående retning, som vist i figur 3-6b).



a) Digitalt ekstensometer brukt til målinger på kuber og prismer



b) Bueekstensometer brukt til målinger på sylindere

Figur 3-6: Ekstensometertyper (Foto: Jonas Kirkhaug [18])

3.3 Prøving av materialegenskaper

Alle borede kjerner/sylindre og støpte Ø150x300 mm sylindere ble prøvd for SDT. Kjerneboret måler 100 mm utvendig, noe som gir betongkjerner med diameter ca. 95 mm. Etter at de ble boret ble de saget i endeflatene for å få en jevn spenningsfordeling under prøvingen. De ferdig preparerte sylindrene måler derfor ca. Ø95x190 mm. Etter saging ble de lagret fuktig (under fuktige strisekker) og testet innen ca. 48 timer. Etter utført SDT-prøving ble arbeidsdiagram bestemt på alle prøver, med unntak av noen prøver fra 2020 som ble testet laststyrt til brudd da prøvemaskinen benyttet til arbeidsdiagram var ute av drift. Dette gjelder alle prøvene fra prismene. Terningene på 100 mm ble prøvd for vanlig laststyrt trykkfasthet.

3.3.1 Stiffness Damage Test (SDT)

Kjernene på ca. Ø95x190 mm (og de støpte sylindere på Ø150x300) blir prøvd i henhold til en såkalt «Stiffness Damage Test» (SDT). Dette er en prøvningsmetode som består av fem vekslinger med en trykkspenning opp til et spesifikt lastnivå. En typisk spennings-tøyningskurve fra testen er illustrert til venstre i figur 3-7. Testen var i utgangspunktet utviklet som en ikke-destruktiv testmetode ved lave lastnivå (5,5 MPa) slik at prøvene videre kunne bli re-testet enten ved andre ekspansjonsnivå eller for andre tester. Tanken bak testen var at for et skadet prøvestykke så vil sekant E-modulen til pålastingskurven være betydelig mindre enn den første delen av avlastingskurven som kan representere stivheten til en uskadet betong. Forskjellen mellom på- og avlastingskurvene uttrykker forbrukt energi (hysteres) for prøvestykket som kan være direkte relatert til lukking av mikroriss. En relativ uskadet prøve vil bevege seg opp og ned langs samme linje. Ulike undersøkelser har videre evaluert og prøvd å kvantifisere både prøvemethoden og ulike skadeparametere [9, 14, 21-25]. En av hovedutfordringene med metoden som ble rapportert var at forholdet mellom ekspansjonen og ulike skadeparametere varierer for ulike typer av tilslag og betongresepter (betongens fasthet).

Sanchez et al. [6, 25] testet ulike input-parametere, som lastnivå, tilslagstype og betongfasthet for å undersøke påvirkningen det hadde på resultatene. I denne undersøkelsen ga et lastnivå på 40 % av 28-døgnsfastheten bedre resultater enn et fast lastnivå. Dette lastnivået ga heller ikke noe skade på prøvestykkene. Videre undersøkte de også ulike skadeparametere, blant annet «Stiffness Damage Index» (SDI), som beregnes etter ligning 3-1. Denne verdien er forholdet mellom summen av hysteresen eller forbrukt energi (SI) og totalt tilført energi (SI+SII) for alle fem lastsykler. Arealene som representerer disse verdiene, er illustrert i til høyre i figur 3-7 for den første syklene. Forholdet uttrykker mengden av tilført energi som systemet forbruker. Sanchez et al. [6] konkluderte med at bruken av en slik indeks bedre representerer skadebildet til prøvene når ekspansjonen utvikler seg. En alternativ SDI er å beregne SI og SII som før, og så dele SI på SI + SII for hver lastsykel og så summere disse bidragene, som gitt i ligning 3-3. Denne metoden er også gitt i masteroppgaven til Oddbjørn Oseland [26]. Da på- og avlastingskurvene vil nærme seg hverandre for de siste syklene vil de siste faktorene gå mot null. Denne metoden er derfor mindre avhengig av antall sykler enn den ordinære SDI-verdien som vil gå mot null når antall vekslinger øker. Et alternativ til SDI som også ble diskutert i [5] var å kun inkludere noen av syklene.

Samme testmetode og skadeparametere som beskrevet av Sanchez et al. [6, 25, 32] ble også benyttet av Kongshaug et al. [14]. Siden undersøkelsene i disse laboratorieriene er en fortsettelse av det arbeidet, er de samme testprosedyrene benyttet her. Følgende skadeparametere fra testen er undersøkt:

- *SDI*: Forholdet mellom summen av hysteresen (SI) delt på tilført energi (SI+SII) for alle sykler gitt av ligning 3-1. Arealene som representerer disse verdiene er illustrert i figur 3-7 for den første syklene.

$$SDI = \frac{\sum_{i=1}^5 SI_i}{\sum_{i=1}^5 (SI_i + SII_i)} \quad (3-1)$$

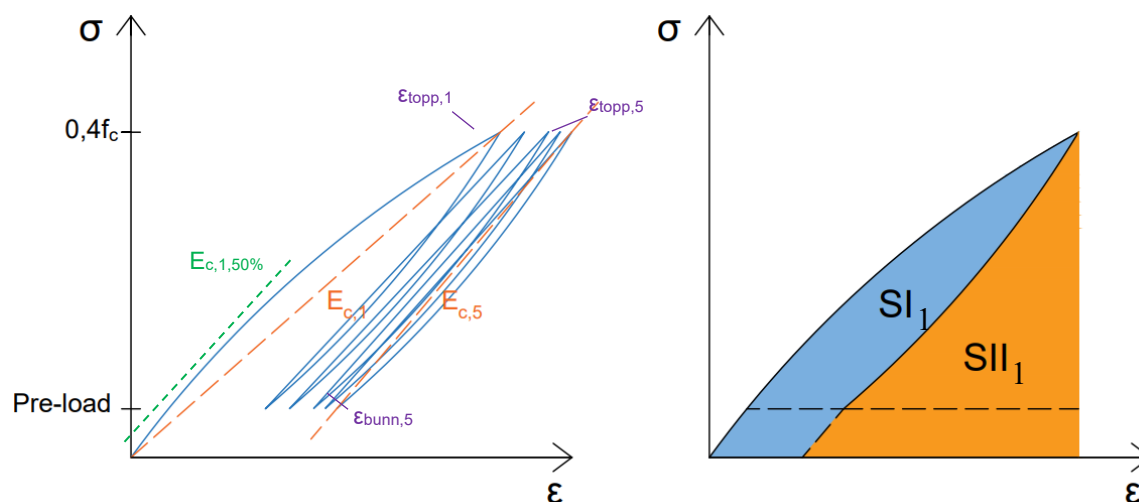
- *SDI₂*: Bidraget til SDI fra kun den andre syklene:

$$SDI_2 = \frac{SI_2}{(SI_2 + SII_2)} \quad (3-2)$$

- SDI_{alt} : Summen av forholdet mellom hysterese (SI) og tilført energi (SI+SII) for hver lastsykel:

$$SDI_{alt} = \sum_{i=1}^5 \frac{SI_i}{(SI_i + SII_i)} \quad (3-3)$$

- E_5/E_{ref} : Den gjennomsnittlige sekant E-modulen av den siste på og avlastingskurven (nr. 5), delt på en referanse E-modul for uskadet betong. Etter fem sykler vil disse kurvene nærme seg hverandre, denne verdien er dermed antakelig det beste estimatet for stivheten til den skadde betongen.
- $\Delta E_{opp,1-E,5}$: Forholdet mellom sekant E-modulen til den første pålastingen og gjennomsnittet av den femte på- og avlastingen. Blir gitt som økning i desimaler, $1-E_1/E_5$.
- PDI : Forholdet mellom den plastiske deformasjonen/tøyningen ved siste avlasting ($\epsilon_{bunn,5}$) og den totale deformasjonen/tøyningen ved maks last på siste sykel ($\epsilon_{topp,5}$).
- NLI : Forholdet mellom sekant-modulen opp til 50 % av maks last ($E_{opp,1,50\%}$) delt på sekant-modulen ved maks last ved den første sykelen ($E_{opp,1}$).



Figur 3-7: venstre: Illustrert spennings-tøyningskurve fra SDT, høyre: Arealer som representerer forbrukt energi/hysterese (SI) og totalt tilført energi (SII) for den første sykelen

Utførelsen av testen består av fem lastsykler opp til ca. 40 % av 28-døgnsfastheten til betongen (22 MPa for prøvene fra 2019 og 17 MPa for prøvene fra 2020). I testen er sylindrene utstyrt med en tøyningsrigg som måler forskyvningene langs tre generatriser med en vinkel på 120° mellom dem. Figur 3-8 viser testriggen. For utborede sylindere med l/d på 190/95 vil forskyvningen bli målt over en lengde på 100 mm symmetrisk om midtlinjen. For de støpte sylindrene ($l/d = 300/150$) er målelengden 150 mm. Spennings/tøynings forholdet er logført under testen og gir spennings/tøyningskurvene. Prøvestykkene er lastet til en forlast på 10 kN, som for sylindere med $d \approx 95$ mm sammenfaller med en spenning på 1,4 MPa. Deretter er prøven lastet syklisk mellom denne lasten og 40 % av 28-døgnsfastheten. Lasthastigheten er på 0,1 MPa per sekund. Etter endt test prøves sylindrene for vanlig arbeidsdiagram.



Figur 3-8: Rigg ved testing av SDT (Foto: Tore Myrland Jensen)

3.3.2 Arbeidsdiagram og test av trykkfasthet

Etter fullført SDT-prøving blir sylindrene prøvd deformasjonsstyrt til brudd for å bestemme spennings-tøynings forholdet og trykkfastheten. Sylindrene er kjørt med en tøyningshastighet på 0,3 % pr. minutt til brudd. Testprosedyren er beskrevet i NS 3473, Appendix A del A.11.3. En Losenhausen BP500, 500 kN trykkpresse ble brukt. Tøyningene blir her målt mellom tre lineært variable transformatorer mellom stålplater på hver ende av sylindrene. Tøyningen blir derfor målt på hele prøvelengden. I tillegg til fastheten er følgende skadeparametere fra denne testen undersøkt:

- ϵ_{peak} : Tøyningen ved maks last (første punkt med maks last)
- E_{arb} : Sekant E-modulen opp til 40 % av maks last.

For sylindrene testet laststyrt til brudd uten arbeidsdiagram er samme rigg som benyttet til SDT-prøvingen benyttet. Testprosedyren beskrevet i NS-EN 12390-3 [27] ble fulgt med en lasthastighet på 0,6 MPa pr. sekund. Forskjellen i hastighet kan forårsake at bruddet kommer ved en noe lavere (5-10 %) last enn for sylindrene testet for arbeidsdiagram.

For fasthetsprøving av 100 mm terninger ble samme prosedyre som for sylindrene testet laststyrt brukt, men ved bruk av en Toni Technik model 2031 hydraulic load.

4. EKSPANSJONSMÅLINGER

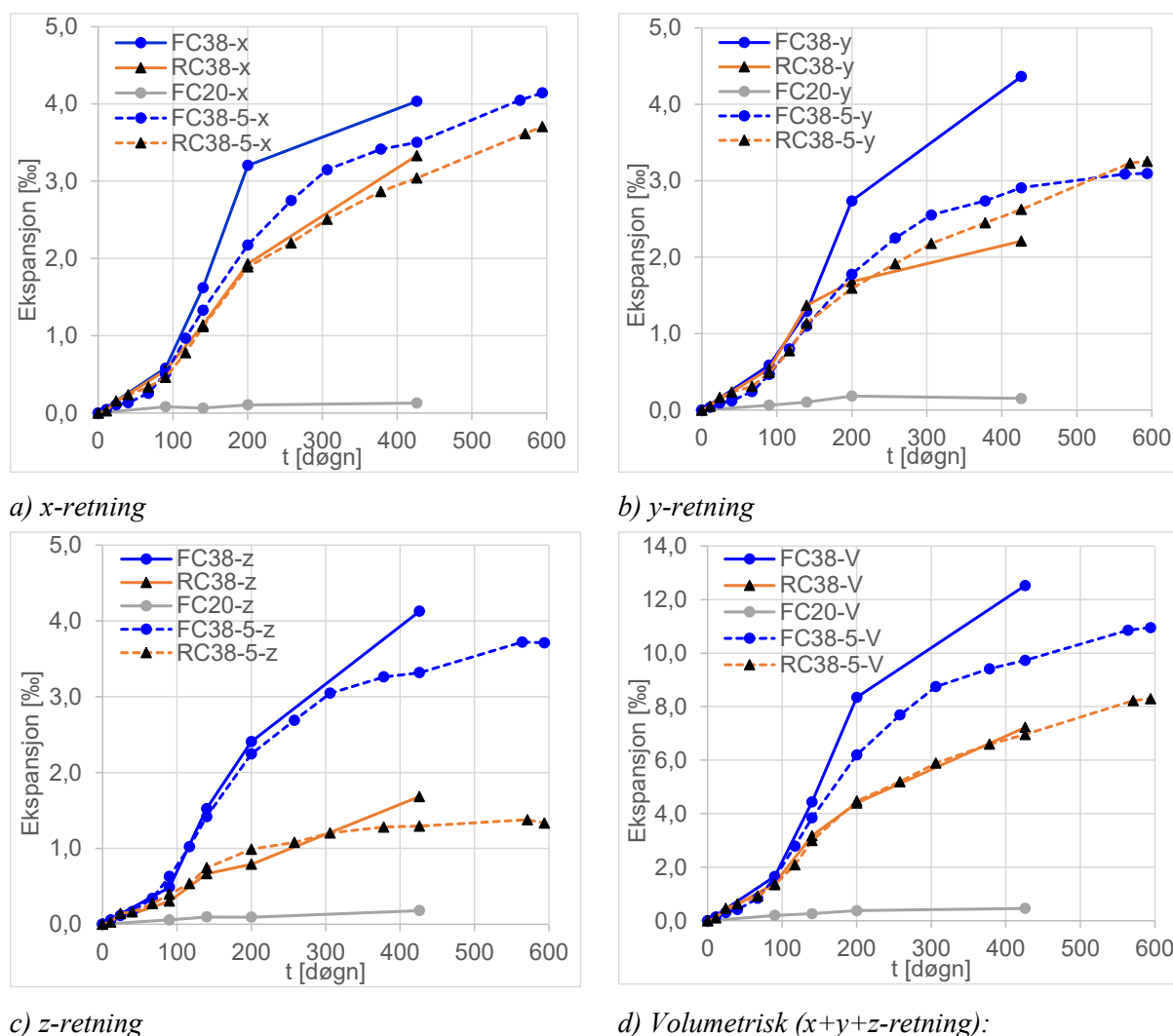
4.1 Resultater og vurderinger av målinger

4.1.1 Kuber

Tabell E-1 og E-2 i vedlegg E viser gjennomsnittsmålingene for kubene fra 2019 og 2020 i de tre retningene etter avsluttet lagring/ekspandering og før utboring og prøving av kjerner. Noen av kubene ble lagret ved 20 °C etter at de ble tatt ut fra 38 °C-rommet, antall døgn er vist i tabellene med parentes. I figurene i dette avsnittet er det målingene ved 38 °C som blir vist da ekspansjonen plottes mot antall døgn de er ekspandert. Alle enkeltmålinger av kubene fra 2019 og 2020 er vist i henholdsvis vedlegg A og B. Gjennomsnittlige verdier og beregnede variasjonskoeffisienter er også vist her.

Kuber fra 2019

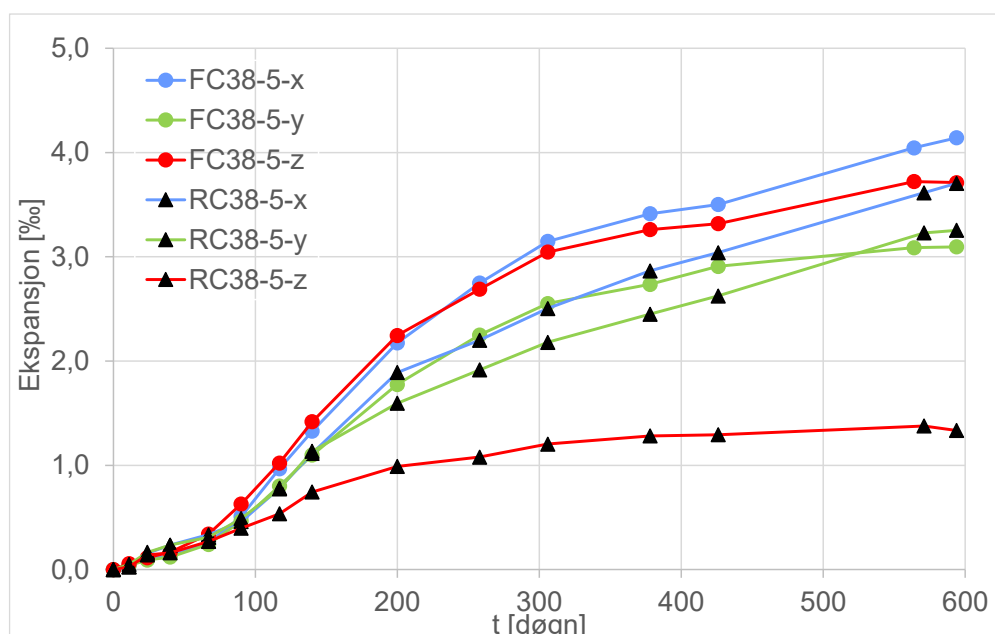
Figur 4-1 viser ekspansjonen til kubene fra 2019, FC38-1 til -4, RC38-1 til -4, plottet mot døgn etter innsetting i 38 °C-rommet. Disse kubene ble kun målt ved uttak fra varmerommet som var henholdsvis, 90-, 140-, 200- og 426 døgn etter at de ble innsatt og referansemålingene ble utført. Ekspansjonen til referansekubene lagret i samme tidsperioder ved 20 °C, FC20-1 til 4 er også vist. Fordi kubene som lagres under samme betingelser i utgangspunktet antas å ekspandere likt er de plottet sammen i felles figurer for x-, y- og z-retning samt volumetrisk tøying, der første punkt på kurvene er målt på kube FC38-1/RC38-1 andre punkt på kube FC38-2/RC38-2 osv. Gjennomsnittlig ekspansjon fra de regelmessig målte kubene (FC38-5, RC38-5) er også plottet i samme figurer med stiplede linjer. I figuren er først hver retning plottet for seg i a) til c) og til slutt den volumetriske tøyingen i d). Tøyingene for de frie kubene (FC38), de med belastning (RC38) og referansekubene (FC20) er plottet med henholdsvis, blå, oransje og grå linjer. Videre er de frie og belastede kubene vist med henholdsvis runde og svarte trekantmarkører.



Figur 4-1: Ekspansjon av kube FC20-1 til 4, FC38-1 til -4, FC38-5, RC38-1 til -4 og RC38-5

Som de enkelte figurene viser, samsvarer resultatene for kubene fra 1. til 4. termin godt med de regelmessige målte kubene, som også vist i vedlegg A. Det er likevel en tendens til at de kubene som har blitt lagret i plastbøttene uten å bli regelmessig målt på (heltrukken linje) har høyere ekspansjon/flater ut mindre. Dette gjelder spesielt i y-retning der man kan se fra tabell A-9 i vedlegg A at sideflate B på kube FC38-5 har en mye lavere ekspansjon. Det kan diskuteres om det er noe galt med dette målepunktet eller om det er et uttrykk for spredningen. Siden kube FC38-1 til -4 kun har en måle-linje i hver retning er det større usikkerhet knyttet til disse resultatene enn de regelmessig målte kubene (nr. 5).

For å sammenligne ekspansjonen i de ulike retningene er tøyningene til FC38-5 og RC38-5 i alle retninger vist i figur 4-2. De blå, grønne og røde linjene viser gjennomsnittsmålingene i henholdsvis, x- y- og z-retning, der z-retning er den belastede retningen. Den belastede kubene er som for figur 4-1 vist med svart trekantemarkør. Kurvene følger en slags S-form, der ekspansjonen er liten i starten før den akselererer og deretter flater noe ut. Det kommer her tydelig frem at ekspansjonen i den fastholdte retningen (RC38-z) gradvis blir mindre enn i de andre retningene og at den delvis flater ut ved en ekspansjon på ca. 1 % etter 200 døgn. Både figur 4-1 og 4-2 viser at det er en viss variasjon mellom sideflatene med fri ekspansjon.



Figur 4-2: Gjennomsnittlig ekspansjon kube FC38-5 og RC38-5 i x- (blå), y- (grønn) og z-retning (rød)

Ekspansjonen i x-retning, (blå linje i figur 4-2) er noe høyere enn de andre retningene, både for de frie og de belastede kubene. Dette er støperetningen, og det er tidligere diskutert i litteraturen [7, 28] at dette kan påvirke ekspansjonen noe fordi dårlig utstøping kan føre til svakere soner under tilslagene i støperetningen som igjen kan føre til at betongen lettere risser opp normalt på denne retningen.

Noe litteratur viser også at en belastning/trykkspenning på et prøvestykke i en eller flere retninger øker ekspansjonen i prøvens fri retninger [7, 8, 11, 29]. Dette ser ikke ut til å stemme for disse prøvene da figurene viser en tendens til at ekspansjonen til de belastede kubene er noe lavere i de frie retningene (x- og y-retning) sammenlignet med de frie kubene. Dette er med unntak av y-retningen til prøve FC38-5 som tidligere diskutert. Dette fører til at den volumetriske ekspansjonen er lavere på denne kuben enn for den frie, som sett i figur 4-1d). En sideveis fastholdning fra stålplatene kan også påvirke ekspansjonen i retningen normalt på lasten. For disse prøvene er dette imidlertid unngått ved å ha to teflonlag mellom betongen og stålplatene. Enkeltmålingene for FC38-5 og RC38-5 er vist i vedlegg A (de andre kubene har kun en måling). Her vises det at spredningen er størst for de frie retningene (variasjonskoeffisient lik 11,8 % ved siste måling), men at den er noe mindre for den belastede kuben enn for den frie kuben (variasjonskoeffisient lik 23,5 vs. 8,4 % ved siste måling). Ekspansjonen til den frie kuben er imidlertid basert på flere målinger. Etter 594 døgn er den gjennomsnittlige ekspansjonen til den frie prøven i x, y og z-retningen 3,65 %, mens den gjennomsnittlige ekspansjonen i x og y-retningen til den belastede prøven er 3,48 %, noe som viser at den gjennomsnittlige ekspansjonen i de frie retningene til disse prøvene er ganske like.

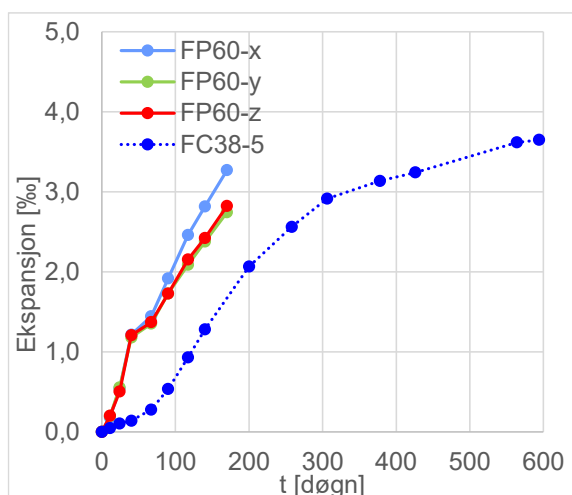
Kube FC38-5 og RC38-5 som ble lagret i 593 dager under akselererte forhold (ved 38 °C) ble i tillegg lagret i 197 døgn ved 20 °C etter avlastning av kube RC38-5. Dette ble gjort primært for å undersøke effekten av avlastingen på ekspansjonen i lastretningen til den belastede prøven. Ekspansjonen fortsetter da å øke med 0,196 % i x-retningen, 0,086 % i y-retningen og 0,124 % i z-retningen til FC38-5 og med 0,380 %, 0,200 % og 0,056 % i de samme retningene

for RC38-5, som vist i Tabell A-10 i Vedlegg A. Gjennomsnittet for alle retningene for FC38-5 og for x og y-retningen for RC38-5, så blir lik henholdsvis 0,135 ‰ og 0,295 ‰. Den belastede prøven har da ekspandert omtrent dobbelt så mye som den frie prøven i de frie retningene etter at den ble avlastet. Mens den videre ekspansjonen i den belastede retningen til RC38-5 er forholdsvis liten, bare ca. 20 % av i de frie retningene. Dette antyder at den belastede prøven har utviklet en overvekt av riss i lastretningen og at den videre ekspansjonen i løpet av denne tiden hovedsakelig skjer i disse rissene.

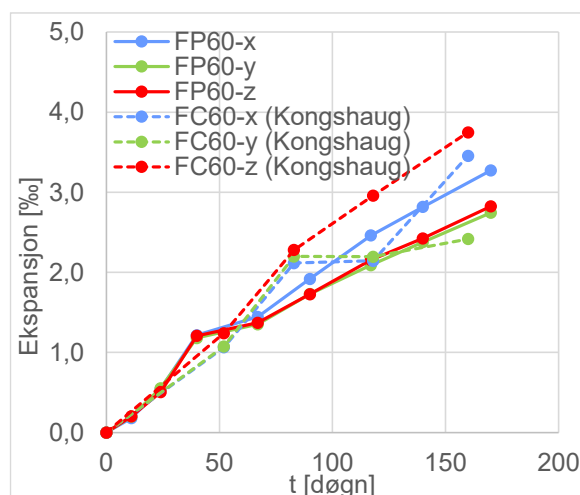
Dette forløpet for den avlastede prøven er likevel ikke forventet å være generelt gyldig. Verdiene må forventes å forandre seg med tiden og at den belastede retningen etter hvert vil øke og nærme seg de andre retningene hvis reaksjonen fortsetter (disse prøvene er antagelig ganske «ferdigeekspanderte»). Hvordan en slik avlasting er forventet å fungere over tid og i en ekte konstruksjon, for eksempel ved at lukkede fuger på ei bru frigjøres, må derfor vurderes i hvert enkelt tilfelle.

Kube lagret ved 60 °C

Kuben lagret ved 60 °C fra 2019 ble målt regelmessig i ca. 170 døgn. Ved dette tidspunktet oppstod det et problem med ekspansjonskammeret som gjorde at prøven ble avkjølt på et litt usikkert tidspunkt, mellom siste og nest siste måling. Kuben hadde da nådd en ekspansjon på ca. 3 ‰ som vist i figur 4-3a) og b). I disse figurene er de gjennomsnittlige målingene i x-, y- og z-retning vist med henholdsvis blå, grønn og rød kurve. Som figuren viser, ser ikke kurven ut til å ha begynt å flate noe særlig ut ved stopp-tidspunktet.



a) Sammenligning med FC38 (fri kube lagret ved 38 °C)



b) Sammenligning med prøver fra Kongshaug [14]

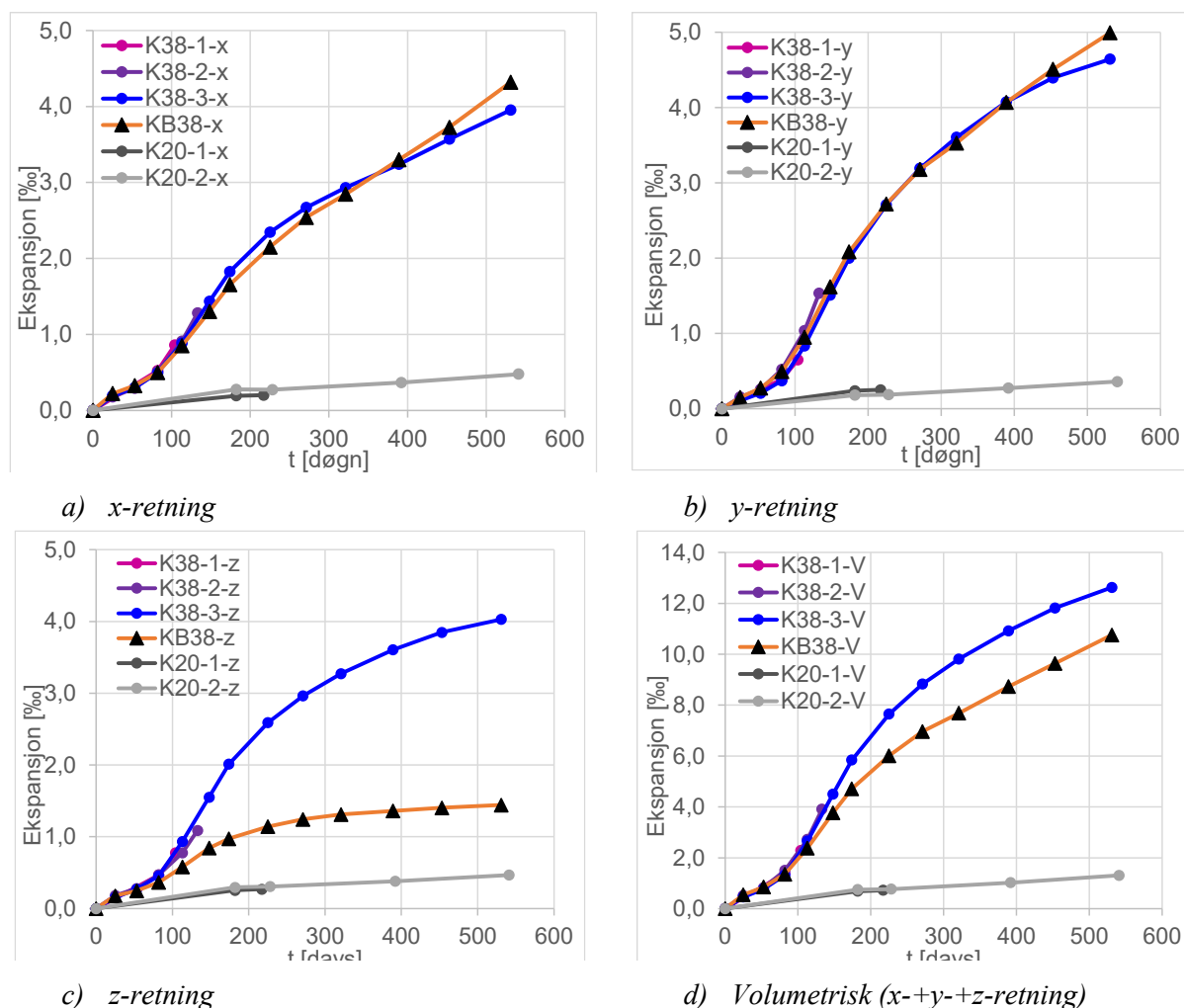
Figur 4-3: Gjennomsnittlig ekspansjon av kube lagret ved 60 °C

Figur 4-3a) viser den gjennomsnittlige ekspansjonen av kube FC38-5 med en stiplet blå linje, som en sammenligning. Kurven til FC38-5 viser at «plataet», der kurven begynner å flate ut, først kommer etter en ekspansjon på ca. 3 ‰. Videre viser figuren at ekspansjonen til prøven lagret ved 60 °C går mye raskere i begynnelsen, men at prøvene har en noenlunde lik hastighet etter en ekspansjon på ca. 1,5 ‰. Målingene gir imidlertid ikke noe svar på hva som skjer med dette forholdet er etter ca. 3 ‰. I figur 4-3b) er tilsvarende resultater fra Kongshaug et al. [14]

vist med stiplede linjer sammen med resultatene fra denne undersøkelsen. Resultatene samsvarer godt og viser at ekspansjonen er ca. 3 % etter 150 dager for begge undersøkelsene.

Kuber fra 2020

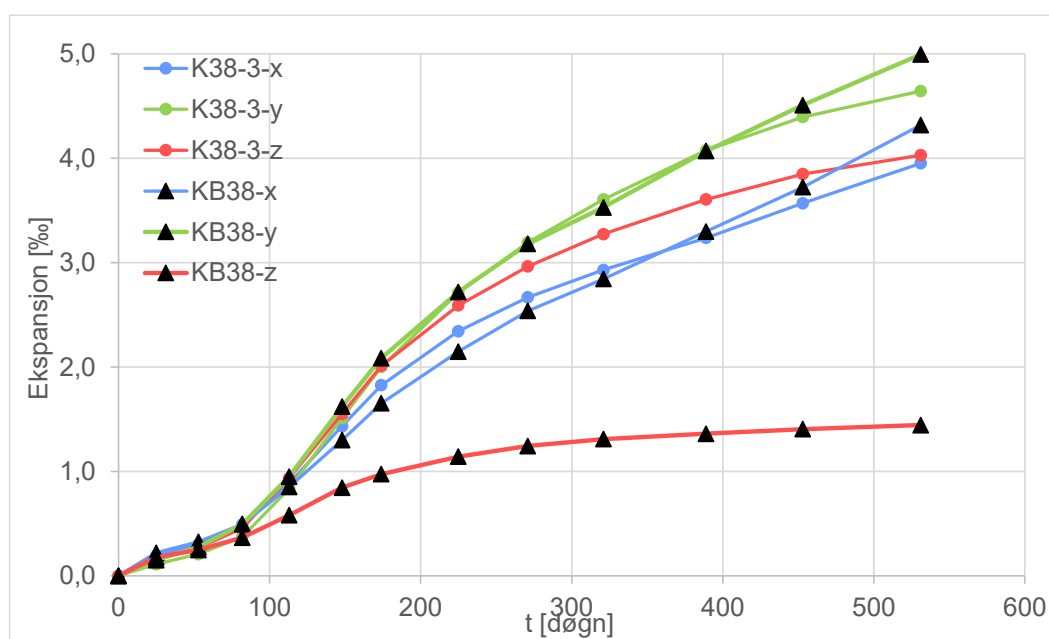
Figur 4-4 viser tilsvarende resultater som i figur 4-1 for kubene fra 2020. Disse kubene ble målt på alle sider og figurene viser gjennomsnittstøyningene. Enkeltmålingene er vist i vedlegg B. Alle disse kubene ble målt regelmessig. I figur 4-4, der a) til d) viser ekspansjonen i alle retninger, er derfor hver kube vist med hver sin linje. Prøvene lagret ved 20 °C, K20-1 og K20-2, er vist med mørk og lys grå linjer. De frie prøvene, K38-1, K38-2 og K38-3, er vist med henholdsvis rosa, lilla og blå linjer, mens den belastede kuben, KB38, er vist med oransje linje og svart trekant-markør. Figur 4-4 viser at ekspansjonene for de frie kubene lagret ved 38 °C samsvarer godt. Kube K38-1 og K38-2 ble som vist i tabell 4-2 lagret i 80-100 døgn ved 20 °C etter at de ble tatt ut av 38 °C-rommet. Målingene ved 20 °C etter endt ekspansjon og rett før testing viser at kubene får en større ekspansjon i dette tidsrommet enn kubene som kun er lagret ved 20 °C. Dette er vist i vedlegg B.



Figur 4-4: Ekspansjon av alle kuber fra 2020; K20-1, K20-2, K38-1, K38-2, K38-3 og KB38

Tilsvarende som for figur 4-2 viser figur 4-5 de gjennomsnittlige ekspansjonene til kube K38-3 og KB38. Merkingen av de ulike retningene og fri og belastet prøve er lik. Som figur 4-4 og

4-5 viser flater ekspansjonen til den belastede prøven i z-retning også her ut etter ca. 1 % ekspansjon ved 200 døgn. Da ekspansjonen i de frie retningene på den belastede kuben er ganske lik som for tilsvarende retninger på de frie prøvene, er de volumetriske tøyningene også her er mindre på den belastede prøven enn på den fri, som vist i figur 4-4 d). Mot ekspansjonens slutt er det imidlertid en tendens til at ekspansjonen i de frie retningene på den belastede prøven øker noe sammenlignet med fri kube. Ekspansjonen er konsekvent minst i x-retning og størst i y-retning, mens ekspansjonen i z-retning på den frie prøven ligger på et gjennomsnitt av disse. Dette fører til at gjennomsnittet av alle retningene for den frie prøven og gjennomsnittet av de frie retningene for den belastede prøven vil ligge på samme linje. Tendensene til kubene fra 2019, at ekspansjonen blir redusert også i de frie retningene på den belastede kuben og at ekspansjonen er høyere i støpe-retningen (x-retning) gjelder ikke for disse kubene. Det er derfor sannsynlig at disse tendensene kun kom av spredningen i fri retning.

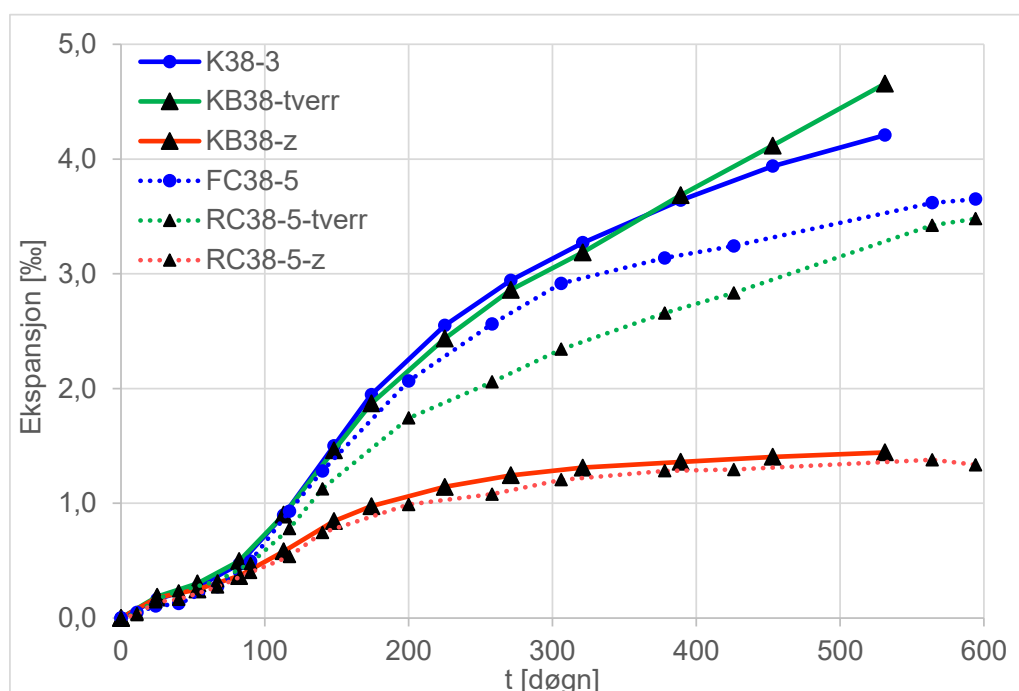


Figur 4-5: Gjennomsnittlig ekspansjon av kube K38-3 og KB38 i x- (blå)-, y- (grønn)- og z- retning (rød)

Ekspansjonen målt på sideflatene i de frie retningene har også her en viss spredning (variasjonskoeffisient lik 16,7 % ved siste måling), som vist i Vedlegg B. Også her er spredningen noe mindre i de frie retningene på den fastholdte kubens sammenlignet med den frie kubens (variasjonskoeffisient lik 12,7 vs. 18,3 % ved siste måling). Tabell B-4 og Figur B-11 i vedlegg B viser at målingene i y- og z-retning på sideflate D (støpe-flaten) på kube K38-3 har en noe større ekspansjon enn målingene på de andre sideflatene. Dette er årsaken til at de gjennomsnittlige ekspansjonene blir noe større i y- og z-retning enn i x-retning. Ekspansjonen er også større i y-retning for den belastede kubens. Her er imidlertid målingene i x- og y-retning er ganske like separat, som vist i figur B-16 i vedlegg B. Det kan derfor tyde på at ekspansjonen til denne kubens er noe større i y-retning (normalt på støpe-retning). Figur B-16 viser også at spredningen er stor i belastet retning (z-retning) for denne kubens. Dette er nærmere diskutert i vedlegg B. Her vises blant annet at forskjellen i målt elastisk deformasjon samsvarer med forskjell i ekspansjon. Det er imidlertid sideflate B og D, som er to motstående sideflater, som ekspanderer mest. Dette vil si at tøyningstilstanden ikke er plan. Siden stålplatene er så stive,

har de ikke mulighet til å sette opp en slik forskjell i spenninger. Forklaringen på forskjellen er derfor mest sannsynlig at teflonsjiktet ikke er stivt og at det da er mulig for prøven å ekspandere noe forskjellig over kontaktflaten og at flaten på grunn av det ikke blir helt plan lenger. Teflonen skvises lokalt ut uten at trykket/lasten antakelig endrer seg noe særlig, som vist i Tabell B-8 i vedlegg B.

For å sammenligne ekspansjonen til kubene fra 2019 og 2020 er gjennomsnittlig ekspansjon av alle sider på de frie kubene FC38-5 og K38-3, de frie sidene på kubene RC38-5 og KB38 (x- og y-retning) og de belastede sidene av RC38-5 og KB38 (z-retning) vist i figur 4-6 med henholdsvis blå, grønne og røde linjer. Kubene fra 2019 er vist med stiplede linjer. Figuren viser, som tidligere nevnt, at gjennomsnittlig ekspansjon av K38-3 og KB38 i fri retning er tilnærmet lik. Gjennomsnittlig ekspansjon av FC38-5 stemmer også godt overens med disse frem til ca. 300 døgn hvor ekspansjonen til denne kuben flater litt mer ut. Ekspansjonen i fri retning på RC38-5 ligger lavere. Høyere v/c (2020-prøvene) gir en mer åpen betong med muligens økt fukttilgang [20], som kan forklare en høyere ekspansjon. Prøvene fra 2019 har imidlertid færre målepunkt enn de fra 2020 noe som gjør dem noe mindre pålitelige og følsomme for lave enkeltmålinger. I den belastede retningen (z-retning) samsvarer gjennomsnittsmålingene for kubene fra 2019 og 2020 godt, noe som verifiserer resultatene fra både fra kubene fra 2019 med færre målepunkt og kubene fra 2020 med noe spredning i resultatene i denne retningen. Siden de er like fører dette til at reduksjonen i ekspansjon i belastet retning sammenlignet med fri retning vil bli noe mindre fra kubene i 2019 sammenlignet med 2020.

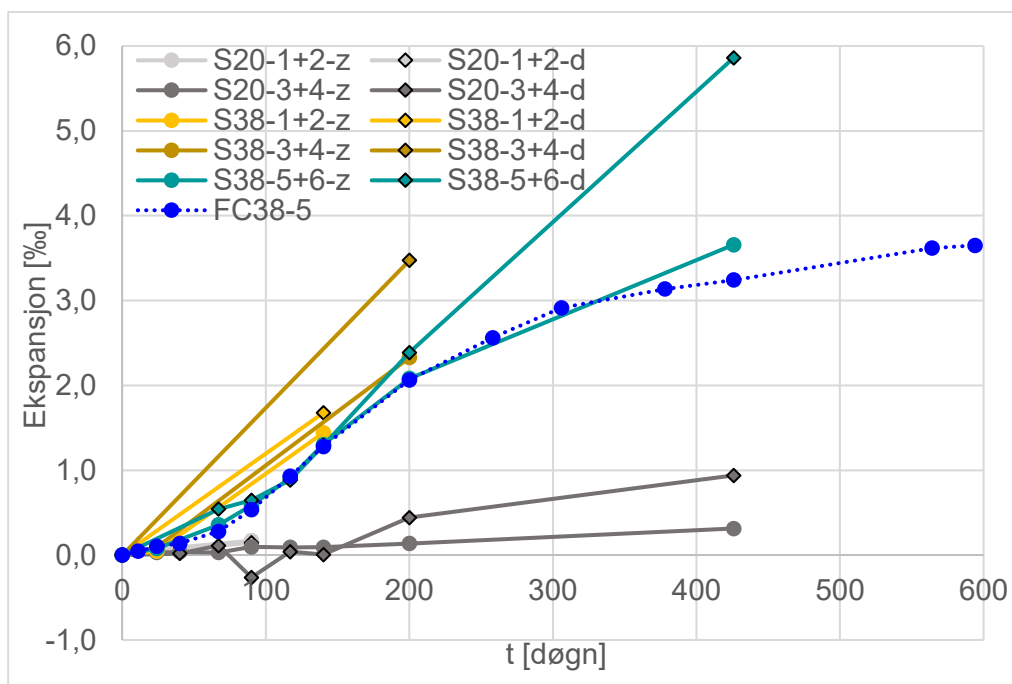


Figur 4-6: Sammenligning gjennomsnittlig ekspansjon mellom frie kuber (blå), belastede kuber i fri retning (grønn) og belastede kuber i belastet retning (rød). 2019-kubene er vist med stiplede linjer, 2020-kubene med heltrukne linjer.

4.1.2 Sylindre

Tabell E-3 i vedlegg E viser de resulterende ekspansjonsmålingene til hver Ø150x300 mm sylinder diamentralt og i lengderetning etter endt lagring/ekspandering og før SDT-testing. Sylindrene testes på samme tidspunkt som kubene og har derfor de samme måleintervallene (se figur 3-2). Figur 4-7 viser gjennomsnittlig ekspansjon av sylindrene med likt antall døgn lagret. S20-1 og S20-2 følger første ekspansjonsnivå vist med lys grå linje, S38-1 og S38-2 andre ekspansjonsnivå vist med gul linje, S38-3 og S38-4 tredje ekspansjonsnivå vist med brun linje og S20-3, S20-4, S38-5 og S38-6 det fjerde ekspansjonsnivået vist med henholdsvis mørk grå og grønn linje. Lengderetningen (z) er vist med sirkulær markør og diametral retning (d) er vist med diamant-markør. Sylindrene tilhørende fjerde nivå ble målt regelmessig, mens de andre kun ble målt endt lagring/ekspandering. Den blå stiplede linjen er også her gjennomsnittsekspansjon av kube FC38-5. Figur 4-7 viser at målingene i sylindernes lengderetning stemmer godt med målingene fra kubene. I diametral retning blir imidlertid ekspansjonen etter hvert mye høyere enn for kubene. Det er også mye større innbyrdes forskjeller på disse målingene.

Erfaringene som ble gjort under disse målingene er at det er mye større usikkerhet knyttet til målinger med bue-ekstensometer enn til målinger med de vanlige rette ekstensometrene som ble brukt på kubene og prismene. Bue-ekstensometrene er mye mer følsomme for trykket mot målepunktene og en er mer avhengig av at samme person gjør det helt likt fra gang til gang. Spesielt gjelder dette for det minste bue-ekstensometeret som ble brukt i diametral retning. Det er derfor sannsynlig at dette kan være en delforklaring på resultatene i figur 4-7. Usikkerheten rundt bue-ekstensometrene er også grunnen til at det er gjort færre målinger mot slutten enn i starten av forsøket.



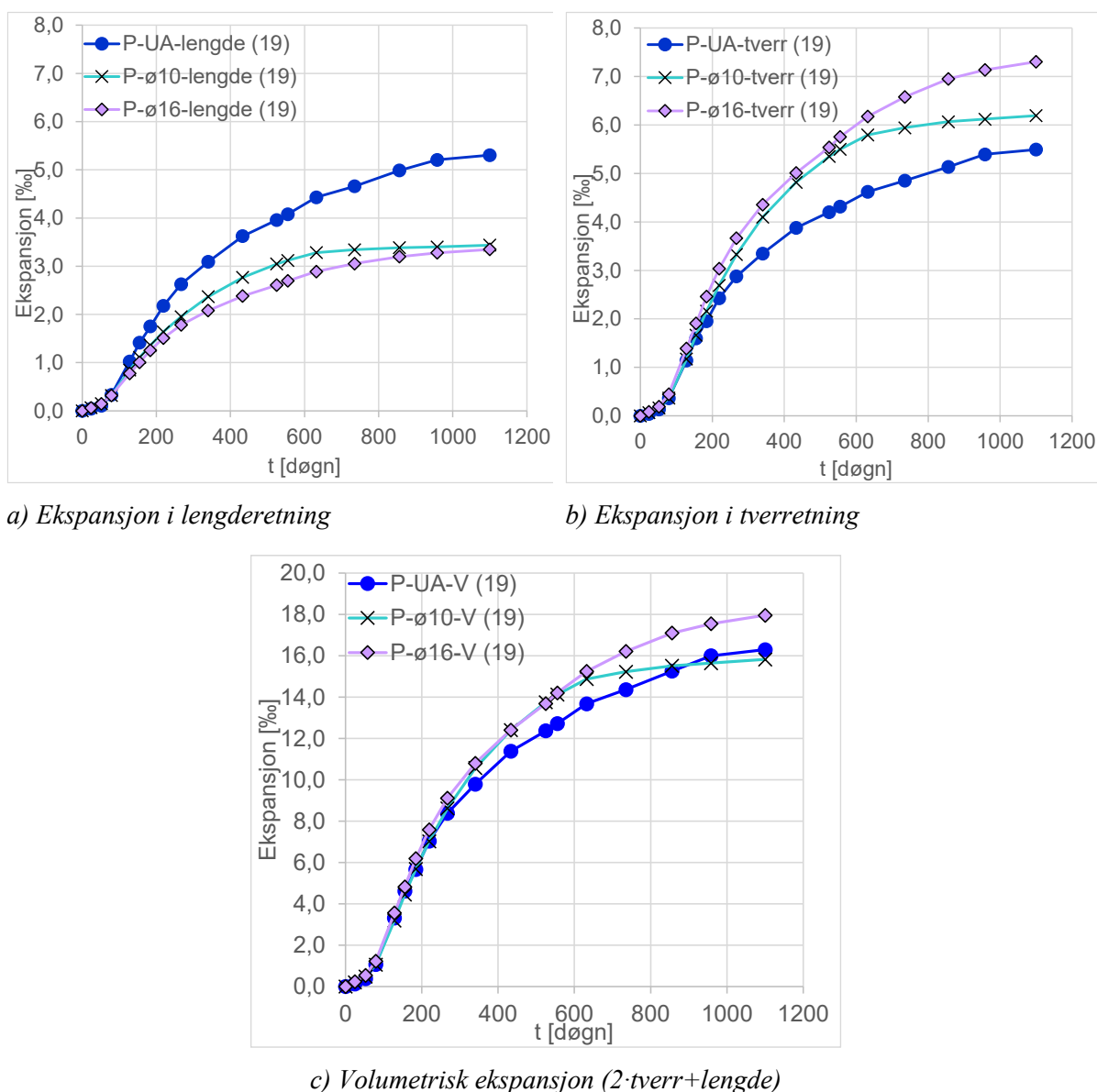
Figur 4-7: Gjennomsnittlig ekspansjon av Ø150x300 mm sylindere i henholdsvis lengderetning (z) og diametralt (d)

4.1.3 Prismer

Tabell E-4 og E-5 i vedlegg E viser de resulterende ekspansjonsmålingene til hvert prisme fra 2019 og 2020 i lengde- og tverretning, mens vedlegg C og D viser alle enkeltmålinger av prismene fra henholdsvis 2019 og 2020 og en vurdering av disse. Prismene er lagret ved 38 °C og 100 % RF i henholdsvis 1100 og 531 døgn. For prismene fra 2020 er også målingene ved endeflatene på tvers av armeringsretningen vist.

Prismer fra 2019

Gjennomsnittlig ekspansjon av de armerte og uarmerte prismene fra 2019 mot tiden i døgn er vist i figur 4-8. Lengderetning, tverretning og volumetrisk ekspansjon er vist i henholdsvis a), b) og c). De blå kurvene med rund markør er for de uarmerte prismene (P-UA), de turkise kurvene med kryss for prismene med 4Ø10 mm stenger (P-Ø10) og de lilla kurvene med diamant for prismene med 4Ø16 mm stenger (P-Ø16). Hvert punkt er gjennomsnittet av 8 målinger. Enkeltmålingene for prismene er vist og diskutert i vedlegg C.

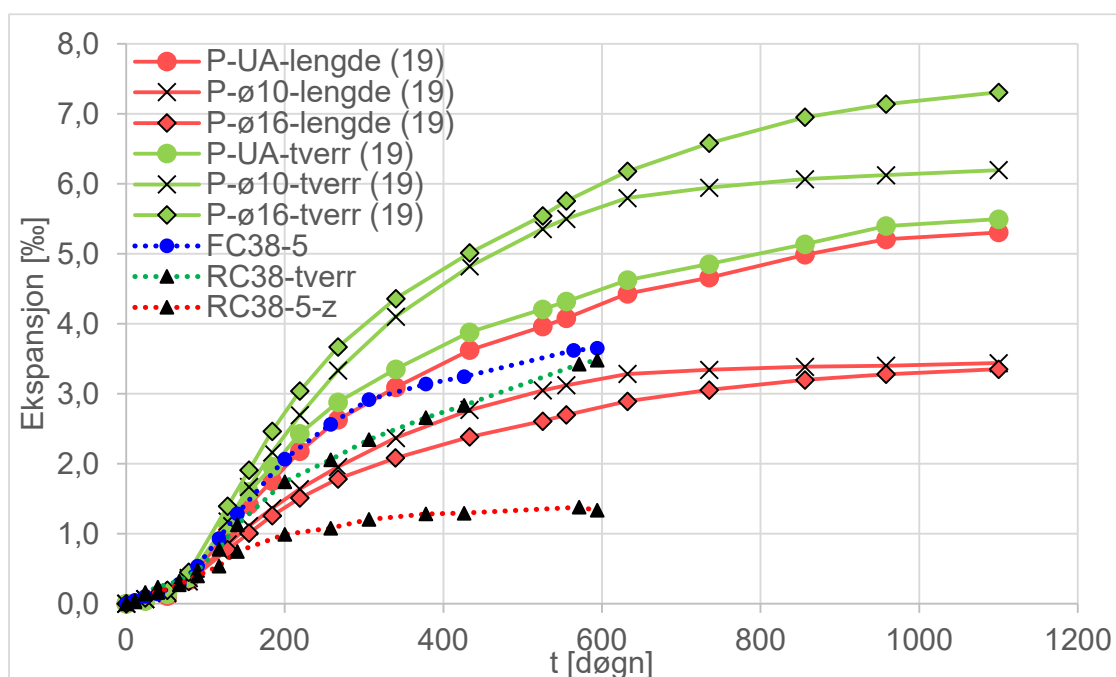


Figur 4-8: Gjennomsnittlig ekspansjonsutvikling av prismer fra 2019; P-UA, P-Ø10 og P-Ø16

Figur 4-8a) viser at prismene med mest armering (P-Ø16) har minst ekspansjon i armeringsretningen. Dette er forventet da det er de prismene som får størst trykkspenning fra armeringen i den retningen ved en gitt ekspansjon. Også prismene med 4Ø10 mm stenger har betydelig mindre ekspansjon enn de uarmerte prismene i denne retningen. Ekspansjonen til P-Ø10 prismene er bare litt høyere enn for P-Ø16 prismene selv om forholdet mellom armeringsmengdene er $0,6\%/1,5\% = 0,4$ i de to tilfellene. Siden P-Ø10 prismene har litt større tøyning P-Ø16 prismene ved samme tid har de også en litt større spenning i armeringen, men forholdet mellom disse kurvene kan likevel tyde på at det skal forholdsvis lite armering til for å få en gunstig effekt på ekspansjonen i armeringsretningen. Denne armeringen ser ut til å redusere ekspansjonen med ca. 30 % i forhold til i de uarmerte eller frie prismene, litt mindre i starten og litt mer ved økende ekspansjonstid. Dette er forventet, da de armerte prismene må ekspandere for at det skal bli en trykkspenning i armeringsretningen.

Videre viser figur 4-8b) at de armerte prismene får høyere ekspansjon i tverretningen enn de uarmerte prismene, slik at den volumetriske ekspansjonen (2·tverr+lengde), vist figur 4-8c), blir ca. lik for de tre prismetypene i denne undersøkelsen frem til ca. 200 døgn. Etter dette tidspunktet blir den volumetriske ekspansjonen for de armerte prismene noe større på grunn av de høye tøyningene i tverretning. De uarmerte prismene har tilnærmet lik ekspansjon i lengde- og tverretningen. Disse resultatene skiller seg fra resultatene til kubene som ble belastet med en konstant trykkspenning under hele forsøket, hvor belastningen i en retning ikke gav noe økt ekspansjon i de andre retningene sammenlignet med de tilhørende frie kubene. Spredningen i ekspansjonen i fri retning er imidlertid ganske høy for prismene med en variasjonskoeffisient mellom 13,6 og 21,0 %, som vist i Tabell C-7 til C-9 i vedlegg C.

For å vise forskjellen mellom kubene og prismene er tøyningsutviklingen til den frie kuben FC38-5 (gjennomsnitt av alle retninger) og den belastede kuben RC38-5 i fri/tverr (gjennomsnitt av x- og y-retning) og belastet (z) retning vist sammen med tøyningene i både tverr- og lengderetning til de armerte prøvene i figur 4-9. I denne figuren er markørene til de ulike prismetypene den samme som i figur 4-8, men kurvene fra tverr- og lengderetningen er henholdsvis grønne og røde. Som figuren viser er ekspansjonen til kubene i fri retning noe lavere enn for de uarmerte prismene i lengde og tverretningen. Denne forskjellen er imidlertid ikke så stor at den forklarer forskjellen mellom ekspansjonen til den den belastede kuben (RC38-5) i den belastede retningen og de armerte prismene i armeringsretningen. Selv om trykkspenningen i de armerte prismene etter hvert vil overstige belastningen på 3 MPa på RC38-5, ser ikke ekspansjonen ut til å flate ut før de også gjør det i fri retning for disse prøvene. Om belastningen er der helt fra starten av eller om den bygger seg opp gradvis med ekspansjonen ser derfor ut til å bety ganske mye for ekspansjonsforløpet i belastet retning.

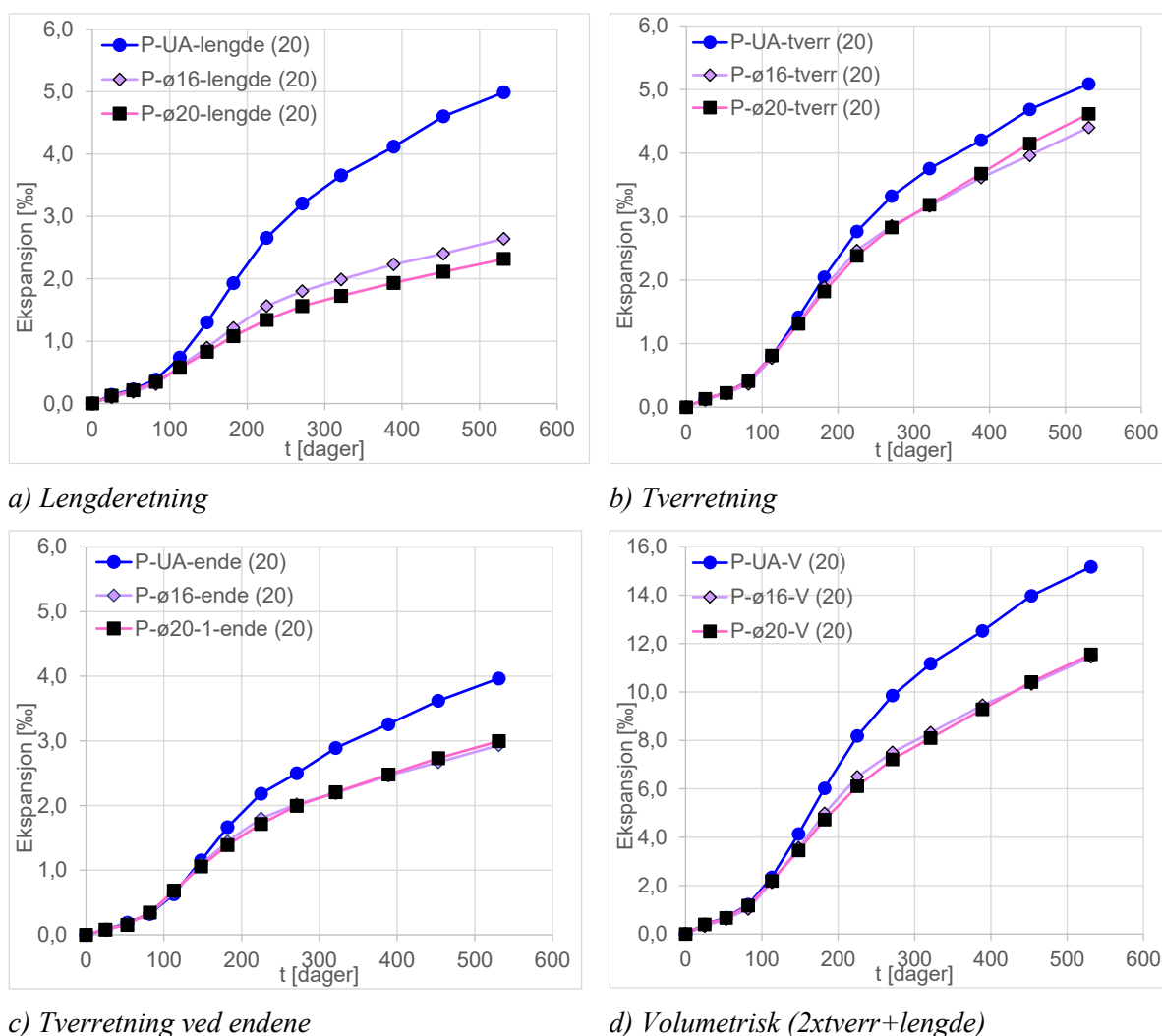


Figur 4-9: Ekspansjonsutvikling for armerte og uarmerte prøvestykker, samt fri (FC38-5) og belastet (RC38-5) kube

Prismer fra 2020

I figur 4-10 er den gjennomsnittlige ekspansjonen til de forskjellige prismetypene fra 2020 vist. 4-10a), b), c) og d) viser tøyningene i henholdsvis lengderetning, tverretning, ved enden i tverretning og volumetrisk (2xtverr+lengde). Merkingen for de uarmerte prismene og prismene med 4Ø16 mm stenger (P-Ø16) er lik som i figur 4-8, mens kurven for prismene med 4Ø20 mm stenger (P-Ø20) er vist med rosa linje og firkant-markør.

Som figur 4-10a) viser blir ekspansjonen i lengderetning for P-Ø20 prismet med ytterligere redusert sammenlignet med P-Ø16 prismet. Dette er forventet da dette er prismene som har størst trykkspenning fra armeringen i den retningen ved en gitt ekspansjon. Tøyningene i tverretning er imidlertid like for begge armeringsalternativene. Tøyningene til det uarmerte prismet i tverretning er større og ca. lik som i lengderetning. Årsaken til dette kan være mye opprissing på overflaten av side B på det uarmerte prismet (se figur D-43b) i vedlegg D)) som gir store tøyninger på langs og på tvers, se tabell D-1 og D-2 og figur D-3 i vedlegg D. Gjennomsnittlig tøyning av de andre side-flatene vil gi en verdi lik de armerte prismenes tøyninger i tverretning. Samtidig har sideflate D en del lavere tøyninger (i begge retninger) som igjen drar ned gjennomsnittet. De uarmerte prismene vil som en skjønner få størst volumetrisk tøyning, deretter avtar den volumetriske tøyningen med armeringsmengden tilsvarende tøyningene i lengderetningen for prismene. Etter 400 døgn øker imidlertid ekspansjonen i tverretning noe mer for P-Ø20 prismet enn for P-Ø16 prismet, som gjør at den volumetriske ekspansjonen til slutt vil bli lik for de to armeringsalternativene.



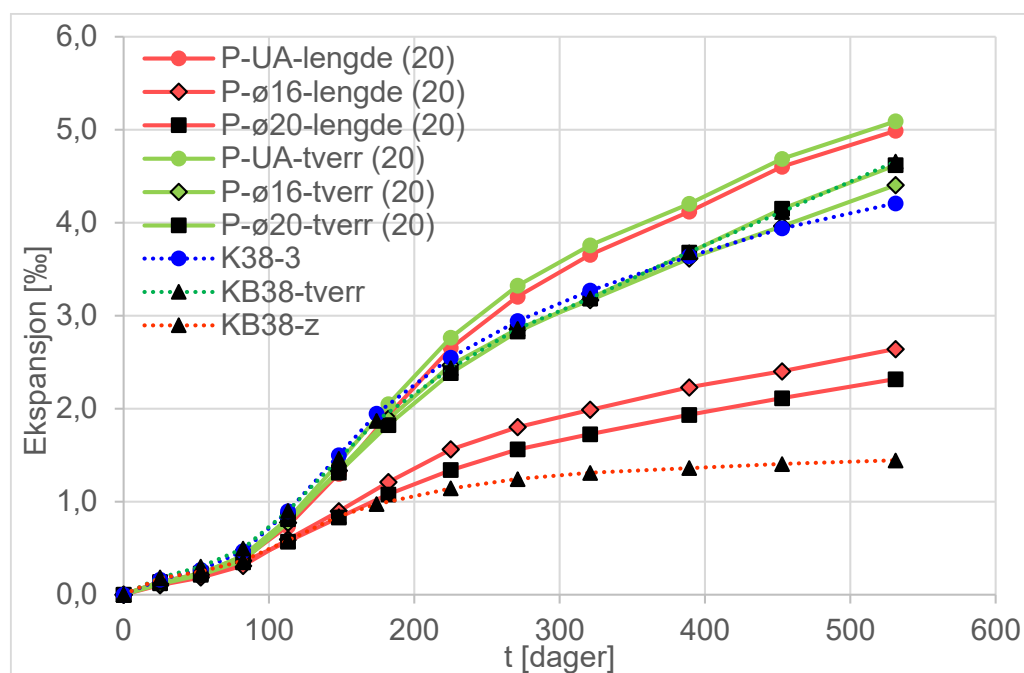
Figur 4-10: Gjennomsnittlig ekspansjonsutvikling av prizmer fra 2020

Enkeltmålingene er vist og diskutert i vedlegg D. Spesielt det uarmerte prismet har en høy spredning både i lengde- og tverretning (variasjonskoeffisient rundt 28 % for begge retninger), selv om den gjennomsnittlige ekspansjonsutviklingen i de to retningene er ganske like. Av de armerte prøvestykkene med 4Ø20 mm stenger har prisme P-Ø20-1 en ganske høy spredning i tverretningen (variasjonskoeffisient lik 29 %) og den gjennomsnittlige ekspansjonen (i tverretning) er større for dette prismet sammenlignet med prisme P-Ø20-2 (som har variasjonskoeffisient lik 12 %), se vedlegg D.3. Gjennomsnittlig ekspansjon i tverretning til de to prismene er imidlertid ganske lik som gjennomsnittlig ekspansjon i tverretningen til P-Ø16 prismet. I lengderetningen er spredningene mindre både for prismene med 4Ø16 (variasjonskoeffisient lik 14 %) og 4Ø20 mm stenger (variasjonskoeffisient lik 20 %). Variasjonskoeffisientene vil variere noe fra måling til måling, se vedlegg D.

Tøyningen på endene i tverretning, vist i figur 4-10c), er for alle kurvene lavere enn det som er målt tverretning midt på sideflatene. Dette er også forventet da stålplatene armeringen er sveist fast i ved endene av prismene vil gi en fastholding også på tvers ved endene. De uarmerte prismene er også festet til stålplater med noen korte stålstenger og vil dermed også få en viss effekt, men den er som en ser mye mindre enn for de armerte prøvestykkene. Tøyningene er ca. 1 % lavere ved enden enn i midten (i tverretning) på det uarmerte prismet og ca. 1,5 %

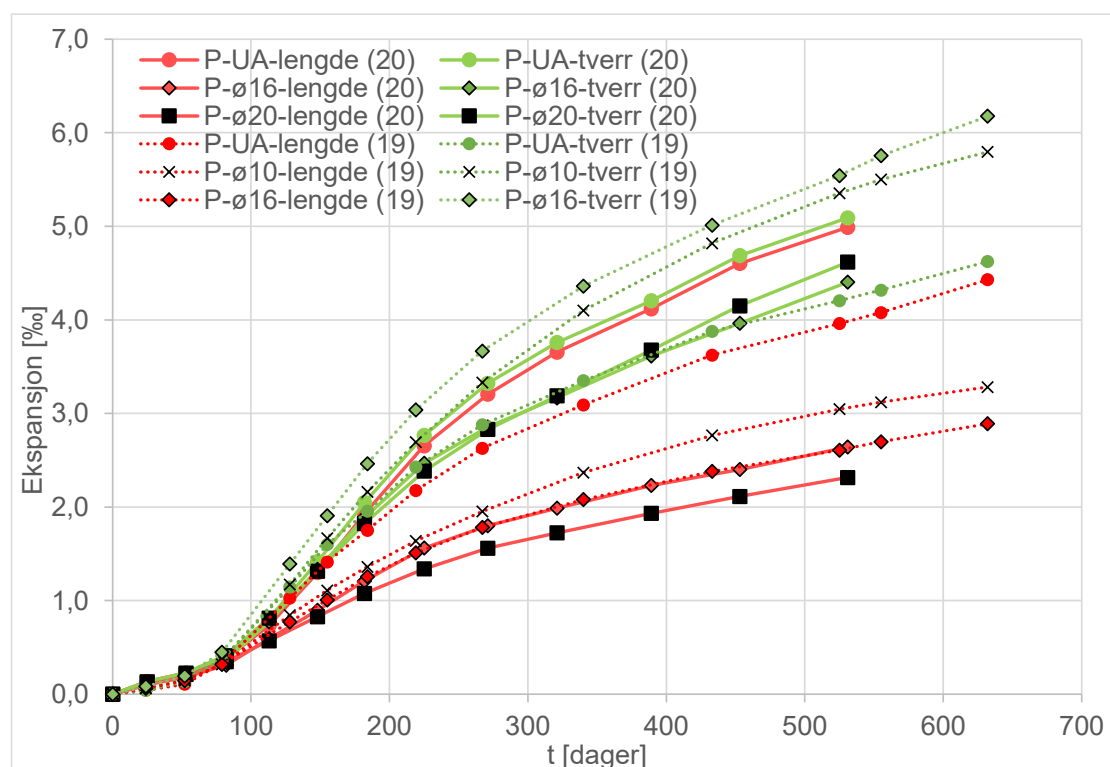
lavere for de armerte prismene etter 531 døgn. Ut fra målingene virker fastholdingseffekten fra platene å være lik for begge armeringsalternativene.

I figur 4-11 er de gjennomsnittlige ekspansjonene i tverr- og lengderetning for de ulike prismetypene vist med henholdsvis grønne og røde linjer. Markørene er lik som i figur 4-10. De er her plottet sammen med ekspansjonene til kubene K38-3 (gjennomsnitt av alle retninger) og KB38, henholdsvis i fri/tverr (gjennomsnitt av x- og y-retning) og belastet (z) retning, fra 2020, tilsvarende som figur 4-9 for prøvene fra 2019. Figuren viser at de gjennomsnittlige tøyningene for den frie kuben og den frie retningen på den belastede kuben er tilnærmet lik som de gjennomsnittlige tøyningene i tverretning (fri retning) for de armerte prismene. Ekspansjonen i belastet retning (KB38-z) er også her lavere enn for de armerte prismene i armeringsretningen. Frem til ca. 150 døgn er de ganske like, deretter flater ekspansjonen i den belastede retningen på kuben ut, mens de armerte prismene forsetter å ekspandere. Dette forholdet blir diskutert nærmere i avsnitt 4.5, men det ser også her, som for prøvene fra 2019, ut til at om belastningen er der helt fra starten av eller om den bygger seg opp gradvis med ekspansjonen betyr ganske mye for ekspansjonsforløpet i belastet/tilbakeholdt retning. Dette på tross av at primene med 4Ø20 mm stenger tidlig i ekspansjonsforløpet vil bygge opp ganske store spenninger.



Figur 4-11: Sammenligning av ekspansjonsutvikling for armerte og uarmerte prismer og frie og belastede kuber fra 2020

En sammenligning av de gjennomsnittlige tøyningene til de armerte prismene fra denne lab-serien og lab-serien fra 2019 i lengde- og tverretning er vist i figur 4-12. Merkingen for prismene fra denne serien er lik som for figur 4-9 og 4-11. Prismene fra 2019 er vist med stiplede linjer. Ekspansjonene til disse prøvene er kun vist frem til ca. samme tidspunkt som prismene fra 2020 for sammenligning. Ekspansjonene ut over dette tidspunktet styres også i større grad av størrelsen av riss på overflatene og er dermed mindre pålitelige.



Figur 4-12: Sammenligning med armerte og uarmerte prismer fra 2019 og 2020

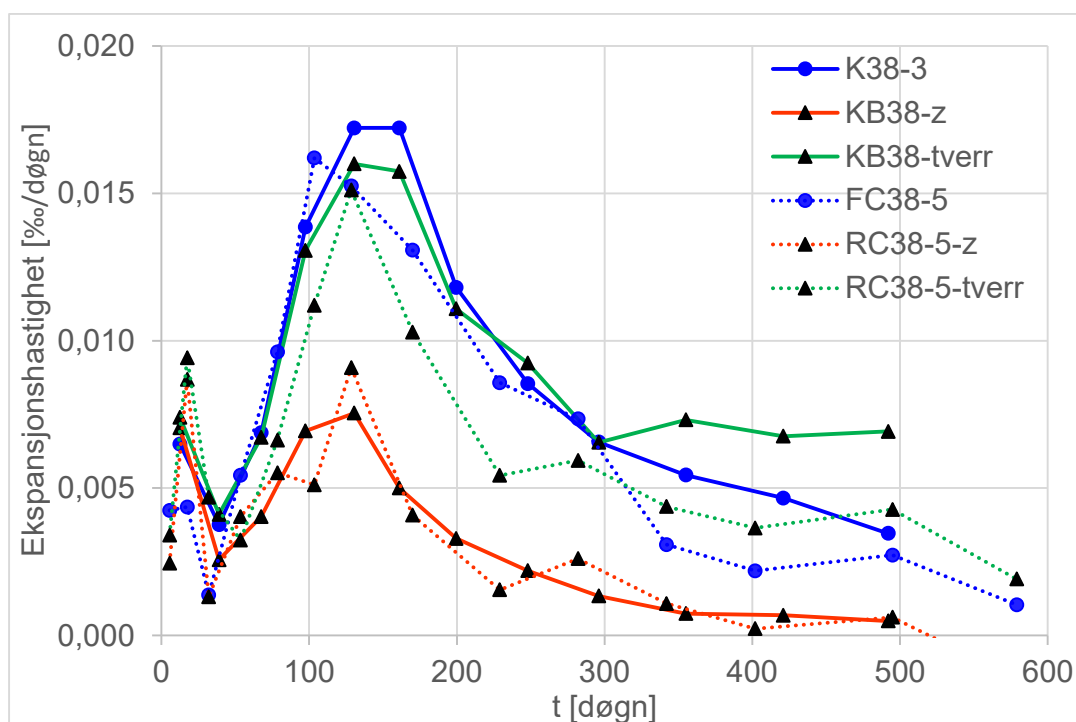
For prøvene fra 2019 var ekspansjonene i tverretning på de armerte prismene større enn ekspansjonen til de uarmerte prismene i både tverr- og lengderetning, som lå på et nivå rundt middelverdien av ekspansjonene til de armerte prismene i tverr- og lengderetning. De volumetriske ekspansjonene til de forskjellige prismetypene var der tilnærmet like. For denne serien ble det derfor diskutert om man hadde overføring av ekspansjon i tverretning der ekspansjonen ble tilbakeholdt i armerings-retningen (lengderetningen). Resultatene fra denne lab-serien viser imidlertid ikke en slik tendens der ekspansjonen for det uarmerte prismet i både lengde- og tverretning er størst. Denne ekspansjonen ligger som vist i figur 4-12 i underkant av ekspansjonskurven til de armerte prøvestykkene fra 2019 i tverretning, mens ekspansjonen i tverretning for de armerte prismene fra 2020-serien ligger ca. likt med ekspansjonen for de uarmerte prismene fra 2019. Den gjennomsnittlige ekspansjonen for alle frie retninger på alle prismene vil ligge ganske likt for begge lab-seriene, se avsnitt 4.2.3.

Litteraturen viser også sprikende resultater for en slik «ekspansjonsoverføring». Noen undersøkelser viser en tydelig overføring der ekspansjonen i fri retning øker med økende trykkspenningsnivå, som fører til en lik volumetrisk ekspansjon på prøvene [11, 29], andre viser en viss effekt, men at den volumetriske ekspansjonen av prøvene varierer for ulike spenningsnivå [7, 8, 13], og noen viser ingen slik effekt [10, 14, 33]. Som beskrevet i Berra et al. [8], er dette antagelig avhengig av mengden alkalier og tilslagstyper, og er derfor materialavhengig. Da denne undersøkelsen også viser sprikende resultater er det nærliggende å anta at det kan skyldes den høye spredningen i fri retning, spesielt ved høyere ekspansjoner der prøvestykkene har mye opprissing på overflatene.

I lengderetning er ekspansjonsutviklingen lik for prøvene med 4Ø16 mm stenger i begge lab-seriene. Prismene med 4Ø10 mm stenger fra 2019 har noe større tøyninger i lengderetning enn de med 4Ø16 mm stenger, mens prismene med 4Ø20 mm stenger har noe mindre. Forholdet mellom armerings mengdene 4Ø16 og 4Ø10 er lik 0,4 (0,6/1,5) og mellom 4Ø16 og 4Ø20 lik 0,6 (1,5/2,4). Tøyningsforskjellen mellom prismene med 4Ø16- og 4Ø20 mm stenger ser imidlertid ut til å være lik tøyningsforskjellen mellom prismene med 4Ø16- og 4Ø10 mm stenger. Dette tyder på at det skal forholdsvis lite armeringsmengde til for å få en reduksjon i ekspansjon, men at størrelsen på denne reduksjonen vil bli mindre og mindre til tross for at spenningene vil bli ganske mye større i prismet med 4Ø20 mm stenger enn prismet med 4Ø10 mm stenger. Dette vil bli diskutert nærmere i kapittel 4.5.

4.1.4 Ekspansjonshastighet

Figur 4-13 viser ekspansjonshastigheten til kubene fra 2019 og 2020. Det vil si økningen av ekspansjonen mellom to påfølgende målinger, $\Delta\epsilon$, delt på tidsintervallet mellom målingene, Δt (%/døgn). Ekspansjonshastigheten er plottet mot tiden midt i hvert tidsintervall. Kurvene viser hastigheten for tilsvarende gjennomsnittlige målinger som vist i Figur 4-6. Merkingen er derfor lik som i denne figuren.



Figur 4-13: Ekspansjonshastighet i %/døgn av frie og belastede kuber fra 2019 (stiplede linjer) og 2020 (heltrukne linjer)

Figur 4-13 viser at ekspansjonshastigheten er noe lavere i de frie retningene på den belastede kuben fra 2019 (RC38-5-tverr) sammenlignet med den frie kuben (FC38-5), noe som stemmer godt med ekspansjonen vist i figur 4-6. Unntakene er ved det første toppunktet ved andre måling hvor kurven for FC38-5 ligger lavere, ved toppunktet etter ca. 130 døgn som er likt, og etter ca. 300 døgn hvor kurven for RC38-5-tverr ligger høyere. Figuren viser at ekspansjonshastigheten i belastet retning (RC38-5-z) både har et lavere andre toppunkt (ved

ca. 130 døgn) og går tidligere mot null. Toppunktet nås ca. samtidig, men er ca. halvparten så stor, 0,0075 ‰/døgn for belastede retning mot 0,017 ‰/døgn for de frie retningene. Kurven til den belastede retningen beveger seg også mot null etter ca. 300 døgn mens kurvene til de frie retningene ser ut til å flate ut på et nivå rundt 0,003 ‰/døgn mellom 350 og 500 døgn før også disse ser ut til å gå mot null.

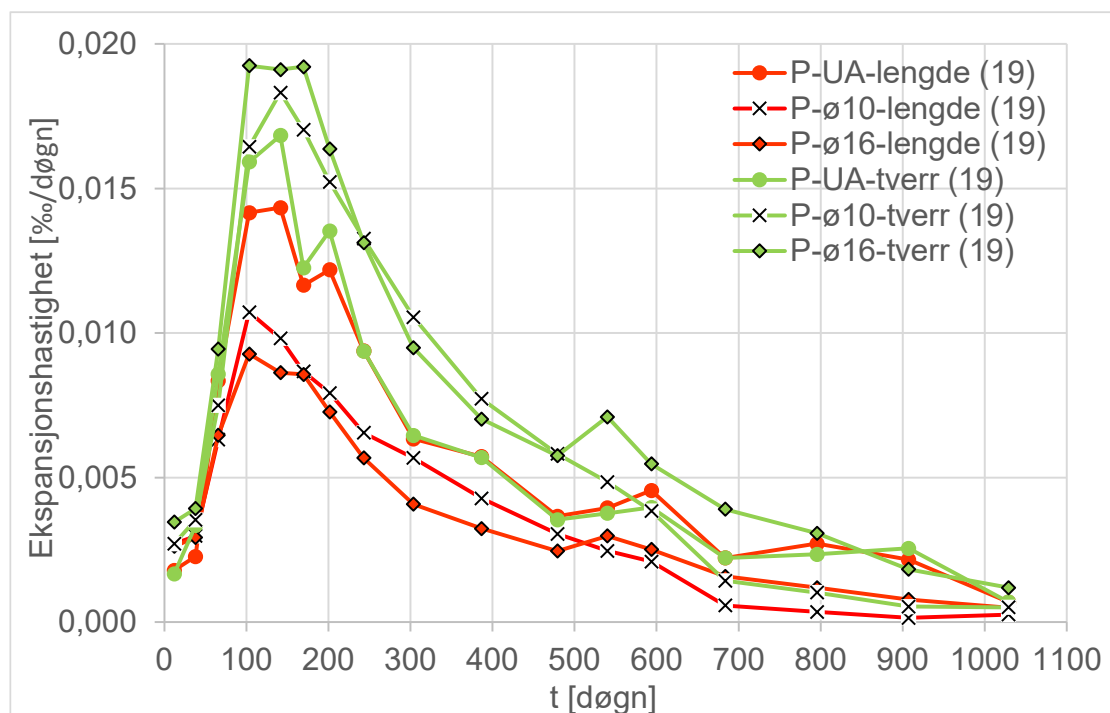
Ekspansjonshastigheten varierer en del i starten for de tre kurvene. For det første tidsintervallet er det små forskjeller i hastighet, men den er lavest i belastet retning, mens hastighetene ved det andre tidsintervallet (første toppunkt) er betydelig større i de to retningene til den belastede prøven enn i den frie prøven. I det tidsintervallet har den belastede prøven også bortimot lik ekspansjon i den belastede og de frie retningene. Den belastede retningen har også noenlunde samme ekspansjonshastighet i dette tidsintervallet som ved det senere toppunktet. Dette er ikke helt logisk og kan tyde på at den belastede retningen har en for stor ekspansjon i det tidsintervallet ved første toppunkt. Noe av årsaken til dette er sannsynligvis at den belastede prøven ble lastet av og på etter å ha vært lagret i en uke (etter første tidsintervall) på grunn av montering av strekkklapper. Dette er beskrevet kort i vedlegg A. Ved pålasting (etter montering) ble det målt en veldig høy elastisk deformasjon og det påfølgende ekspansjonsintervallet var også høyt. Dette gjelder både for den belastede og fri retningen av RC38-5. Ekspansjonsintervall nr. 3 (2. måling etter av- og pålasting) er imidlertid mye flatere noe som forklarer at ekspansjonshastigheten går så mye ned igjen. Dette kan man også se av den frie prøven. En teori er at prøven har trukket seg noe sammen på grunn av temperatur under instrumenteringen. Denne sammentrekningen er derfor med når den elastiske deformasjonen måles etter pålasting. Dette fører også til at ekspansjonen målt ved neste måling har en temperaturekspansjon og derfor blir unormalt høy. Droppet fra 1. til 2. måling skyldes sannsynligvis at en da er i et tøyningsområde hvor det bygger seg opp indre strekkspenninger i pastaen som da klarer å bremse ekspansjonen ganske mye inntil strekkspenningene blir så stor at det begynner å bli riss i pastaen.

Figur 4-13 viser at ekspansjonshastigheten for kubene fra 2020 (K38-3 og KB38) er tilnærmet lik i de frie retningene, noe som også her stemmer med de gjennomsnittlige ekspansjonene vist i figur 4-6. Hastigheten stemmer også godt overens med den frie kuben fra 2019 helt frem til toppunktet hvor kurvene til K38-3 og KB38 holder nivået i et tidsintervall til, mens kurven til FC38-5 faller med en gang etter toppunktet. Dette gjelder også for RC38-5-tverr. Kurven for belastet retning fra RC38-5 ser imidlertid ut til være lik som belastet retning fra KB38 og faller ved punkt nr. 6 hvor hastigheten fortsatt er høy for de frie retningene. Kurvene til de frie retningene på 2020-kubene blir igjen lik med den frie kuben fra 2019 mellom 200 og 300 døgn, før den nok en gang blir lavere. Ved dette tidspunktet flater også kurven til fri retning på KB38 mer ut, mens K38-3 fortsetter å falle (men ikke like raskt som FC38-5). Samme tendens ble også observert for 2019-kubene. Det kan derfor virke som at den belastede kubene vil ekspandere noe mer i fri retning enn den frie kubene når ekspansjonen ser ut til å stoppe i belastet retning.

For 2020-kubene får man ikke det første toppunktet ved andre tidsintervall slik man gjorde på 2019-kubene. Første tidsintervall har imidlertid for alle tre kurvene en høyere hastighet enn andre tidsintervall, før det så øker igjen i tredje. Dette kan også sees på kurvene for

ekspansjonsmålingene vist i vedlegg B der $\Delta\epsilon$ for første måling konsekvent er høyere enn for andre. Kurvene til 2020-kubene er også mye jevnere enn de fra 2019-serien, noe som kan skyldes flere målepunkt som gjør at kurvene er mindre følsomme for utslag på enkeltmålinger.

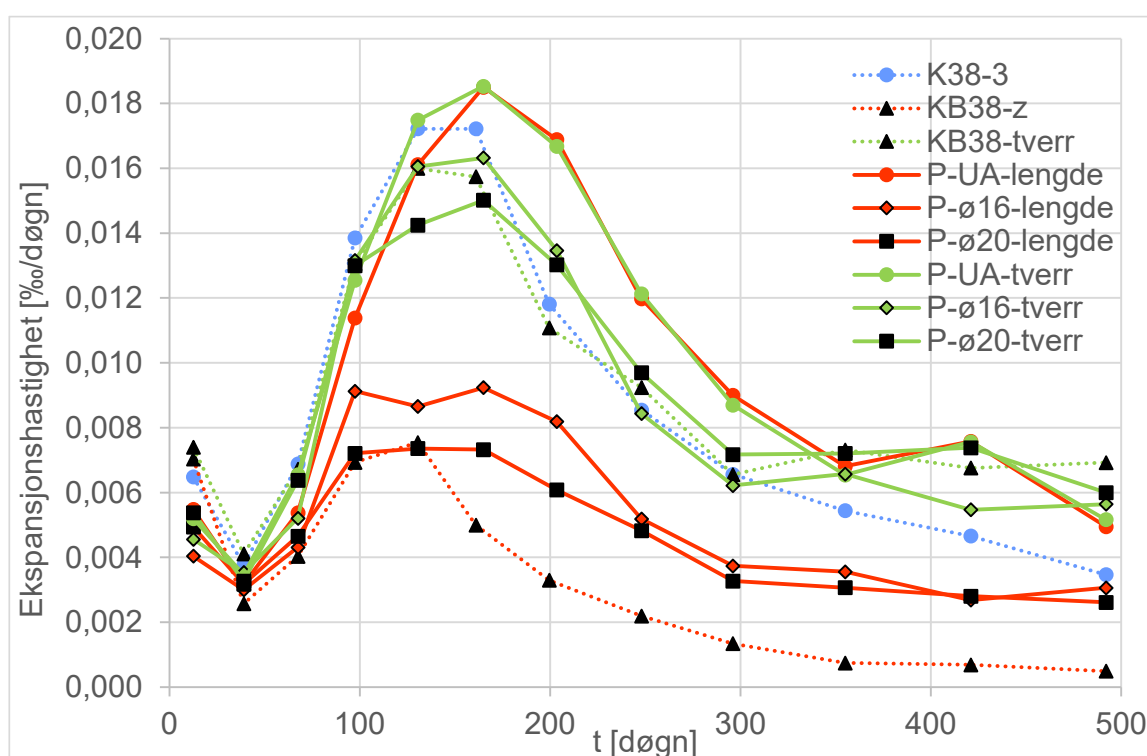
Ekspansjonshastigheten for prismene fra 2019 er vist i figur 4-14. Betegnelsene for de forskjellige prøvestykkene og målingene er de samme som i figurene 4-12. Formen på kurvene ganske like. De når alle toppunktet etter ca. 100 døgn. Kurvene for armeringsretningen til de armerte prismene bøyer imidlertid av på en lavere ekspansjonshastighet enn for de frie retningene. Toppverdien er noe lavere for prismene med 4Ø16 mm stenger (i armeringsretningen) enn for prismene med 4Ø10 mm stenger. Disse kurvene har også lavest ekspansjonshastighet videre i ekspansjonsforløpet og ser også ut til å flate ut ved et litt lavere nivå enn de frie retningene mot slutten av måleperioden. I de frie retningene er ekspansjonshastigheten høyere for de armerte prismene enn for de uarmerte prismene. Det er også et ganske godt innbyrdes samsvar mellom kurvene for ekspansjonshastighet og kurvene for total ekspansjon. Dette er også å forvente siden arealet under ekspansjonshastighetskurvene ville vært lik totalekspansjonen dersom tidsintervallene mellom hver måling hadde vært like.



Figur 4-14: Gjennomsnittlig ekspansjonshastighet for armerte og uarmerte prismar fra 2019 i lengde (røde kurver) og tverretning (grønne kurver)

Kurvene til den frie kuben (FC38-5) og til tverretningene til den belastede kuben (RC38-5-tverr) fra 2019, vist i figur 4-13, er ganske like som kurvene til de uarmerte prismene. Toppverdien i belastet retning for den belastede kuben er også ganske lik toppverdien til primet med 4Ø16 mm stenger i armeringsretningen. Ekspansjonshastigheten faller imidlertid raskere for den belastede kuben enn for de armerte prismene. Kurven for den belastede retningen på kubene går mot null etter 300 døgn, mens prismene i armeringsretningen ikke gjør det før etter 700 døgn.

Forholdet mellom ekspansjonshastigheten til kubene og prismene er bedre illustrert for prøvene fra 2020, vist i figur 4-15, da ekspansjonen til disse prøvene er mer like, resultatene baserer seg på flere målepunkt og prøvene ble like lenge lagret/ekspandert. Beskrivelsene av kurvene er like som i figur 4-11. Kurvene er i dette tilfelle ganske like, de har alle sin høyeste hastighet mellom 100 og 200 døgn før kurvene faller og igjen flater ut etter ca. 300 døgn. Ved fjerde intervall bøyer imidlertid kurvene for armeringsretningen av for en ekspansjonshastighet på ca. 0,07 og 0,09 %/døgn for prismene med henholdsvis 4Ø16 og 4Ø20 mm stenger. Hastigheten i de frie retningene fortsetter imidlertid til de får et toppunkt i det sjette tidsintervallet og er da i overkant av 0,015 for alle de frie retningene. Kurvene for de uarmerte har noe høyere topp enn de andre, som også stemmer med ekspansjonsutviklingen. Etter 300 døgn flater kurvene til de frie retningene ut mot en verdi på ca. 0,07 og begge kurvene i armeringsretningen ut mot en verdi på 0,03.



Figur 4-15: Sammenligning ekspansjonshastighet armerte og uarmerte prismar og frie og belastede kuber fra 2020

Sammenlignet med prismene fra 2019 kan en se at kurvene i de frie retningene er nokså like og samsvarer med forskjellene i ekspansjonen som vist i figur 4-12, der tverretningene til de armerte prismene fra 2019 har størst hastighet og kurvene til de uarmerte prismene i lengde og tverretning fra 2019 har minst. Kurvene til armeringsretningene samsvarer også med forholdet mellom ekspansjonene, der kurven til prismet med 4Ø10 mm stenger (fra 2019) har størst ekspansjonshastighet og prismet med 4Ø20 mm stenger har minst (fra 2020). Kurvene til prismene med 4Ø16 mm stenger er like fra de to seriene og ligger midt mellom kurvene til prismene med 4Ø10 mm og 4Ø20 mm. Kurven til prismet med 4Ø10 mm stenger vist i figur 4-14 skiller seg litt ut fra kurvene til de andre prismene i armeringsretningen, den faller på et tidligere tidspunkt og ser ut til å ha en ganske lineær utvikling mot null (etter 800 døgn) uten å

flate ut etter ca. 300 døgn. Den er derfor høyere enn de andre kurvene frem til 500 døgn hvor den bli mindre.

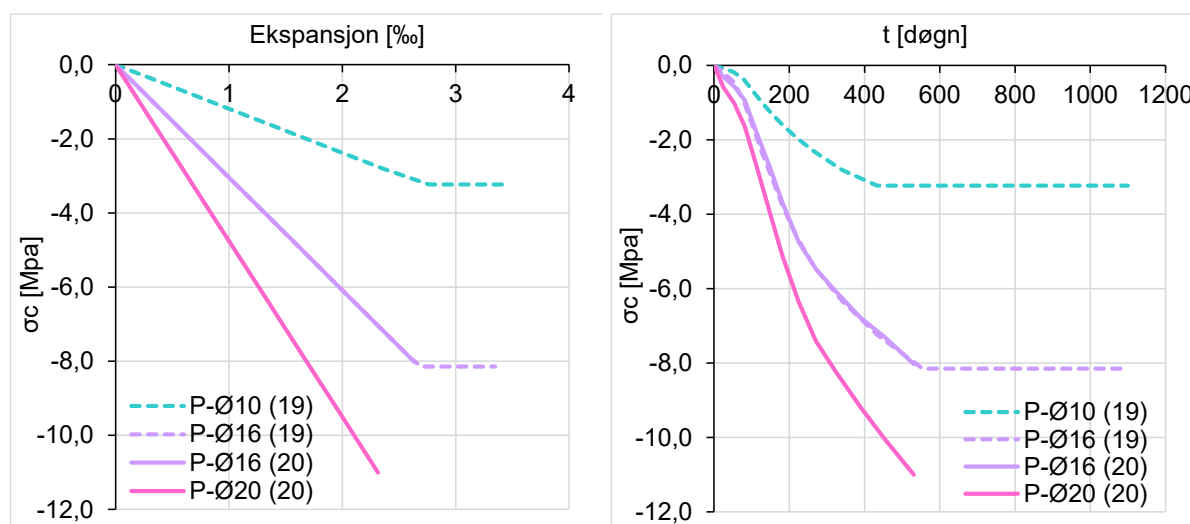
De stiplede kurvene tilhørende kubene fra 2020 i figur 4-15 er helt like de vist i figur 4-11 (med heltrukne kurver). Figuren viser at kurvene til de frie retningene på kubene er ganske like som for de i tverretningen til de armerte prismene, noe som også stemmer med ekspansjonsutviklingen. Kurven til den belastede retningen på kube KB38 følger kurven til prismet med 4Ø20 mm stenger i lengderetningen frem til målingen ved ca. 140 døgn. Det vil si at disse kurvene har samme toppunkt. Ved neste tidsintervall faller imidlertid kurven til den belastede kuben med 0,0025, mens kurven til prismet med 4Ø20 mm stenger fortsetter med samme hastighet. Etter 300 døgn flater kurven til belastede kubene ut mot null, mens kurven til prismet med 4Ø20 mm stenger flater ut mot en hastighet 0,003. Dette til tross for at spenningen i de armerte retningene på prismene i dette tidspunktet har mye høyere spenninger enn den belastede kubene. Både kubene og prismene fra 2020 har som en kan se fra figuren en høyere hastighet ved første intervall enn ved andre. Prismene fra 2019 har imidlertid ikke en slik effekt.

4.2 Virkning av trykkspenninger på ekspansjonen

4.2.1 Spenningsutvikling i armerte prismer

De belastede kubene, RC38-5 og KB38, har en konstant trykkspenning på 3 MPa i z-retningen helt fra starten av ekspansjonen. De armerte prismene har ingen trykkspenning i starten. Det bygger seg imidlertid gradvis opp spenninger i betongen når en armert prøve ekspanderer fordi kraften i armeringen til enhver tid må være i likevekt med kraften i betongen. Siden armeringen får strekk ved en ekspansjon, vil betongen da få trykk. Spenningene i betongen kan bestemmes ved å sette kraften i armeringen ved en gitt tøyningstilstand direkte på det rene betongtverrsnittet, som er tverrsnittet uten armering, med motsatt fortegn. En får da en lineær relasjon mellom spenningen i betongen og graden av ekspansjon helt til armeringen flyter og det ikke bygges opp noe mer spenning før eventuelt ved store tøyninger når armeringen fastner. Dette er vanligvis utenfor det aktuelle området for AR-ekspansjoner.

Spenningsutviklingen i betongen for de armerte prismene, både 2019 og 2020, er vist i figur 4-16. I figur 4-16a) som funksjon av ekspansjonen i armerings-retningen og i figur 4-16b) som funksjon av tiden. Det er ved disse beregningene forutsatt at tøyningene til armeringen er lik det som blir målt på overflatene til prismene og at stålplatene i endeflatene er stive nok til å fordele trykkspenningen jevnt over hele prøven. Prismene med 4Ø10, 4Ø16 og 4Ø20 mm stenger er vist med henholdsvis turkise, lilla og rosa linjer. Resultatene fra 2019 er vist med stiplede linjer, de vil imidlertid overlappe hverandre for prismet med 4Ø16 mm stenger. Armeringens flytespenning er vist i tabell 2-2. Flytning oppstår for begge armeringsalternativene fra 2019-serien ved en ekspansjon på ca. 2,7 ‰. Trykkspenningen i betongen for prismene med 4Ø10 og 4Ø16 mm stenger er da henholdsvis ca. 3,2 og 8,2 MPa. Prismene fra 2020 ble avsluttet før de nådde flytning, trykkspenningen i betongen for prismene med 4Ø16 og 4Ø20 mm stenger var da henholdsvis 8,0 og 11,0 MPa.

a) Utvikling av σ_c med ekspansjon i armert retningb) Utvikling av σ_c med tidenFigur 4-16: Spenningsutvikling i betongen, σ_c [MPa], til de armerte prismene

4.2.2 Vurdering av tøyningstilstanden i last/armeringsretningen til kubene og prismene

En forskjell på kubene og prismene som til nå ikke har vært diskutert, er hvordan kryp og elastisk deformasjon behandles. De belastede kubene er målt før og etter både på- og avlasting. Dette gjør at ekspansjonen kan måles uten den elastiske deformasjonen. Målinger før og etter på- og avlasting er for disse prøvene vist i vedlegg A og B. Tabell 4-1 viser også den målte elastiske deformasjonen til de belastede kubene fra 2019 og 2020. Som tabellen viser, er tøyningene lave sammenlignet med AR-tøyningene. Resultatene viser også at noe av deformasjonen ikke går tilbake etter avlasting, noe som tyder på at det oppstår noe irreversibelt kryp. Den elastiske deformasjonen er uansett ikke veldig stor. Med en referanse E-modul på 34000 og 32000 MPa for prøvene fra henholdsvis 2019 og 2020 (se avsnitt 5.1) gir en spenning på 3 MPa en beregnet elastisk deformasjon på 0,088 og 0,094 ‰, som stemmer bra med de målte elastiske deformasjonene.

Tabell 4-1: Målt elastisk deformasjon, $\varepsilon_{el,def}$ [‰], for belastede kuber fra 2019 (RC38-5-z) og 2020 (KB38-z) ved på- og avlasting

	RC38-5-z (2019)	KB38-z (2020)
$\varepsilon_{el,def,på}$ [‰], ($t_0 = 37/87$)	-0,099	-0,098
$\varepsilon_{el,def,av}$ [‰], ($t = 633/614$)	0,055	0,027

Det vil også oppstå en viss kryptøyning for denne lasten, men denne vil være ganske begrenset pga. den lave elastiske deformasjonen. Kryptall kan beregnes etter Model Code 2010 [31] punkt 5.1.9.4.3b), gjengitt i ligning 4-1:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_{bc}(t, t_0) + \varphi_{dc}(t, t_0) \quad (4-1)$$

Der t er betongens alder i øyeblikket som vurderes, t_0 er betongens alder ved pålasting, $\varphi_{bc}(t, t_0)$ er basiskrypkoeffisienten og $\varphi_{dc}(t, t_0)$ er uttørkingskrypkoeffisienten. Da $RH \approx 100 \%$, faller leddet med uttørkingskrypkoeffisient bort for disse prøvene. Basis koeffisienten gitt i ligning 4-2:

$$\varphi_{bc}(t, t_0) = \beta_{bc}(f_{cm}) \cdot \beta_{bc}(t, t_0) \quad (4-2)$$

der:

$$\beta_{bc}(f_{cm}) = \frac{1,8}{(f_{cm})^{0,7}}$$

$$\beta_{bc}(t, t_0) = \ln \left(\left(\frac{30}{t_{0,adj}} + 0,035 \right)^2 \cdot (t - t_0) + 1 \right)$$

$$t_{0,adj} = t_{0,T} \left[\frac{9}{2+t_{0,T}^{1,2}} + 1 \right]^\alpha \geq 0,5 \text{ dager}$$

α er avhengig av sementklassen (α satt til -1 her for styrkeklasse 42.5R).

Med $f_{cm} = 54$ og 43 MPa (middelverdi av sylindrefasthet ved 28-døgn), $t_0 = 37$ og 83 døgn og $t = 633$ og 614 døgn for henholdsvis RC38-5 (2019) og KB38 (2020) blir kryptallet lik og $0,67$ og $0,57$. For en E-modul på 34000 og 32000 MPa blir da kryptøyningen ca. $0,055 \%$ ($\varepsilon_{cs} = \varphi(t, t_0) \cdot \sigma_c / E_c$), som er ganske lavt sammenlignet med en total AR-tøyning på ca. $1,5 \%$. Det er da ikke tatt hensyn til en reduksjon av E-modul på grunn av AR, som kan gi en noe større kryptøyning.

Da trykkspenningene i betongen til de armerte prismene bygger seg opp gradvis, har ikke disse prøvene en umiddelbar elastisk deformasjon som kan måles. Tøyningene som måles inneholder derfor en gradvis større tøyning både pga. trykkspenning og krypt. Da tøyningene etter hvert blir ganske store for prismene er det sannsynlig at kryptet og den elastiske deformasjonen kan være noe større her enn for kubene. Krypt og elastisk deformasjon for disse prøvene er derfor beregnet med lineær superposisjon gitt i Model Code 2010 punkt 5.1.9.4.3a), gjengitt i ligning 4-3.

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \varepsilon_c(t_0) + \varepsilon_{cc}(t, t_0) = J(t, t_0) \sigma_c(t_0) = \left(\frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\varphi(t, t_0)}{E_{c28}} \right) \sigma_c(t_0) \quad (4-3)$$

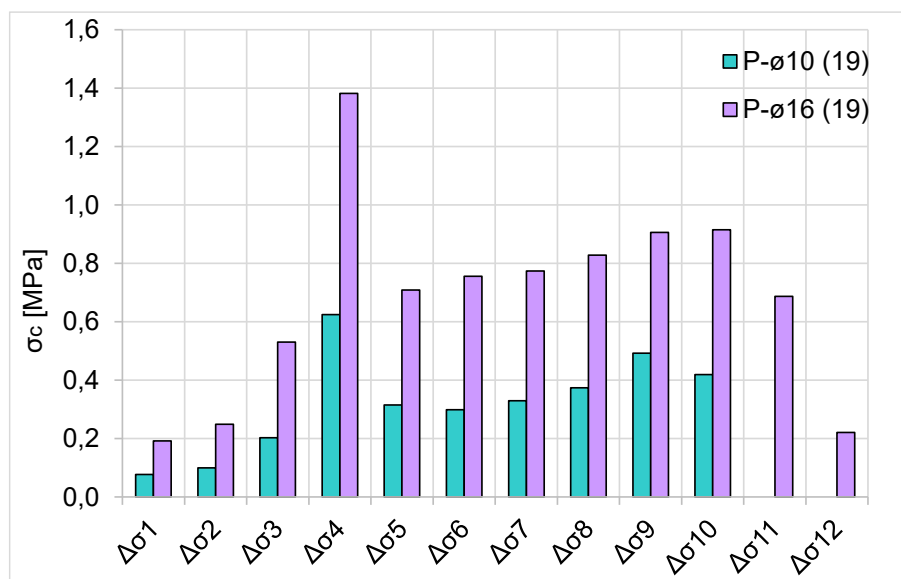
der $\varphi(t, t_0)$ er kryptallet fra likningen gitt over.

På grunn av høy temperatur ved påføringen av den gradvis økende spenningen blir modenheten til betongen justert ved å justere t_T etter ligning 5.1-85 i Model Code.

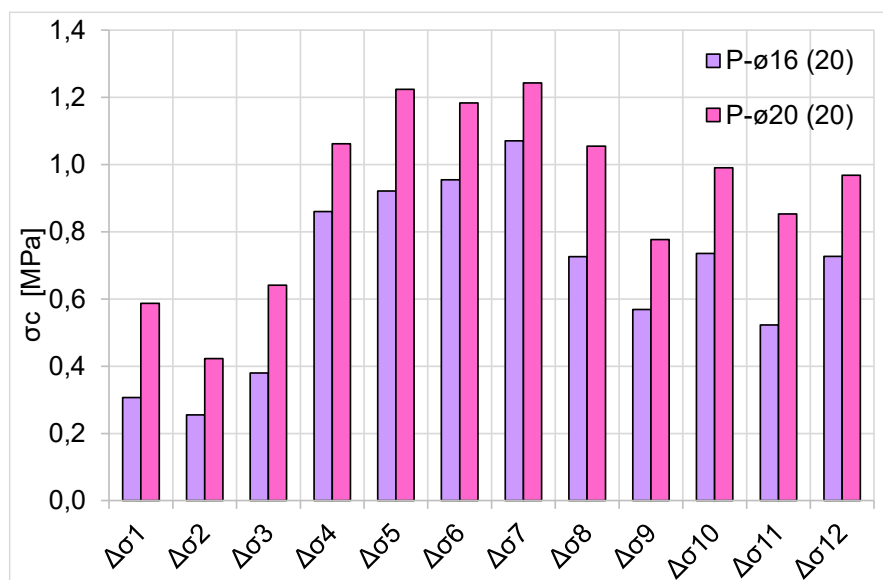
$$t_T = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \exp \left[13,65 - \frac{4000}{273+T(\Delta t_i)} \right]$$

Der Δt_i er antallet dager hvor temperaturen forekommer (før lasten påføres i hvert laststeg) og $T(\Delta t_i)$ er temperaturen i denne perioden. Med $T = 38 \text{ }^\circ\text{C}$ blir denne $t_{T,0} = t_0 \cdot 2,2$.

Trykkspenningene som bygger seg opp i betongen i prismene, vist i figur 4-16, er delt opp i ulike inkremer mellom hver ekspansjonsmåling, $\Delta \sigma_i$. Størrelsen på disse inkrementene er vist i figur 4-17a) og b) for prismene fra henholdsvis 2019 og 2020 (spenningene er i trykk, men er her vist som positive). Tiden t_0 , som er tiden der lasten påføres er satt til halvparten av tiden i hvert inkrement siden lasten bygger seg opp gradvis. $E_c(t_0)$ er E-modulen ved tiden lasten påføres. E-modul reduksjonen som benyttes er vist i avsnitt 5.3.1.



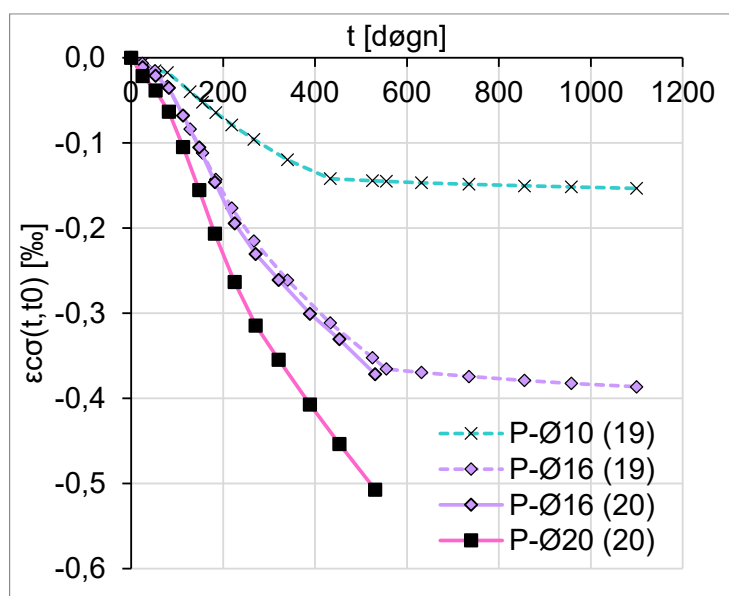
a) P-Ø10 og P-Ø16 fra 2019



b) P-Ø16 og P-Ø20 fra 2020

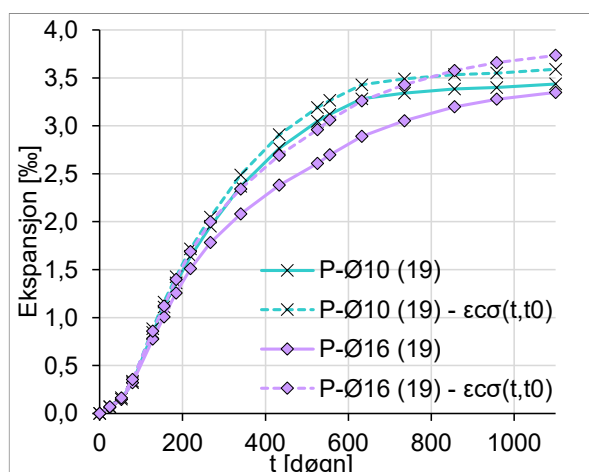
Figur 4-17: Spenningsinkrementer, $\Delta\sigma_i$, for armerte prismer fra 2019 og 2020

Beregningene er satt opp skjematisk i et regneark. De resulterende krypttøyningene for de ulike prismene ved en gitt tid, $\varepsilon_{c\sigma}(t, t_0)$, er vist i figur 4-18. Tøyningene er negative/ motsatt av ekspansjonen. Plataet på kurvene til prismene fra 2019 viser når armeringen flyter dermed ikke bygger opp noen videre spenninger. Kryptallene fortsetter imidlertid å øke for de allerede påførte spenningene som gjør at tøyningene fortsetter å øke noe. Prismene fra 2020 når aldri flytning.

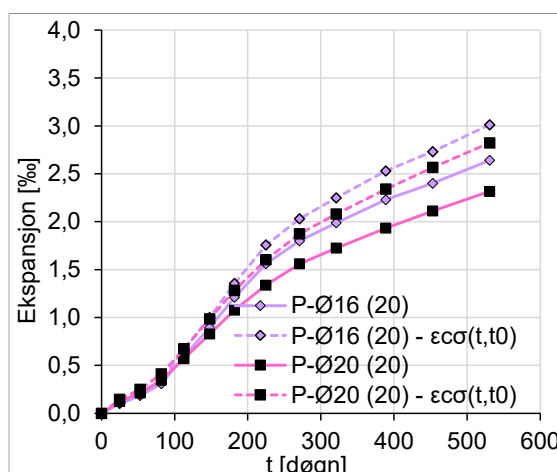


Figur 4-18: Tøyning pga. kryp og elastisk deformasjon, $\varepsilon_{c\sigma}(t,t_0)$, for prismene fra 2019 og 2020 som funksjon av tiden, t , i døgn

Figur 4-19a) og b) viser ekspansjonen til prismene i lengde/armeringsretning. De heltrukne kurvene viser de målte ekspansjonene som inneholder tøyningen pga. kryp og elastisk deformasjon, mens i den stiplede linjen er dette trukket fra (denne tøyningen er negativ).



a) Prismene P-Ø10 og P-Ø16 fra 2019



b) Prismene P-Ø16 og P-Ø20 fra 2020

Figur 4-19: Ekspansjonen til prismene i armeringsretningen med og uten kryptøyninger $\varepsilon_{c\sigma}(t,t_0)$ som funksjon av tiden, t , i døgn

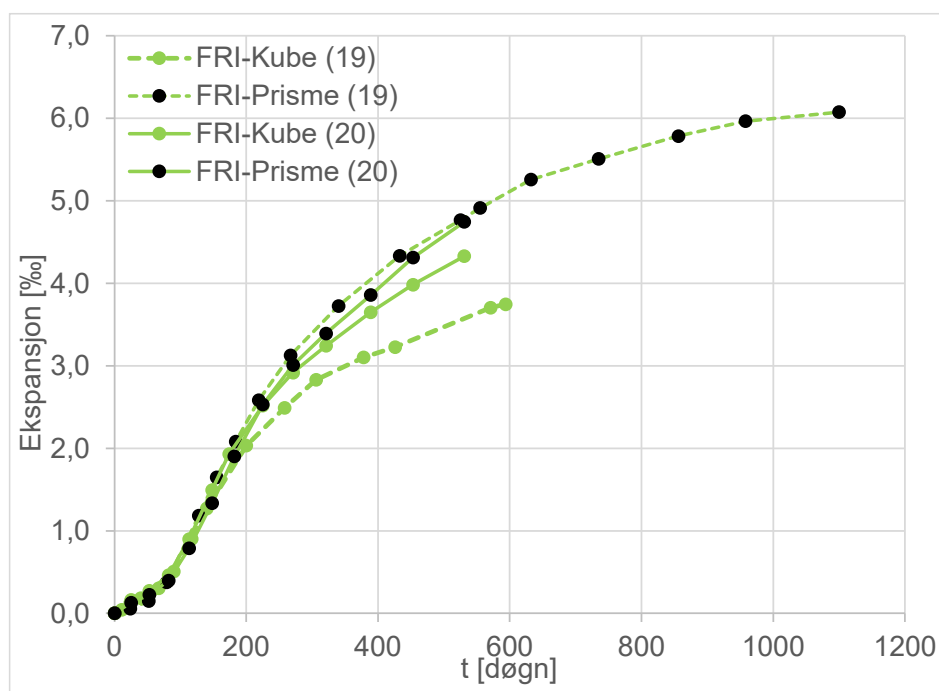
4.2.3 Vurdering av fri og fastholdt ekspansjon

Fri ekspansjon

For å vurdere effekten av trykkspenningene på ekspansjonen og forholdet mellom fri- og fastholdt ekspansjon må det defineres en referanse ekspansjon (den frie). Fastholdt ekspansjon er definert som ekspansjonen i armeringsretningen for prismene og belastet retning for kubene. For å bestemme den frie ekspansjonen har det vært nødvendig med en grundig gjennomgang av enkeltmålingene vist i vedlegg A, B, C og D. Resultatene viser at det er stor spredning i de frie retningene, dvs. alle retninger på de ubelastede kubene og uarmerte prismene, retningene

på tvers av armeringsretningen (tverretning) på de armerte prismene og retningene normalt på belastningen på de belastede kubene (x- og y-retning). Etter hvert som ekspansjonen blir større, er forskjellen på ekspansjonene også i stor grad avhengig av opprissing på overflatene til prøvestykkene. Flere av prismene viser også større ekspansjon på to parallelle overflater i tverretningen enn på de to motstående. Standardavvikene og variasjonskoeffisientene er også vist i vedleggene, og viser at spredningen jevnt over er ganske lik for de ulike prøve-typene. Den er imidlertid noe høyere for prismene da disse baserer seg på en del flere målinger. Det ble besluttet å benytte gjennomsnittet av alle enkeltmålinger i alle de frie retningene som referanse. Referansene er beregnet for kubene og prismene fra hvert år separat. Variasjonskoeffisienten til gjennomsnittsmålingene i fri retning ved ca. 530 døgn er 12,7, 23,2 16,7 og 20,1 % for henholdsvis 2019-kubene, 2019-prismene, 2020-kubene og 2020-prismene.

For kubene fra 2020 og prismene fra både 2019 og 2020 er alle enkeltmålinger i de frie retningene benyttet. En enkelt målelinje i y-retning på den frie kuben fra 2019, FC38-B-y, er imidlertid en del lavere enn de øvrige er det besluttet å fjerne denne ved bestemmelse av referansekurven for disse kubene. Alle referanselinjene er plottet i figur 4-20 med grønne linjer. Her er kurvene til prismene vist med svart markør, mens alle kubene er vist grønne markører. Prøvene fra 2019 og 2020 er vist med stiplede og heltrukne linjer. Referansen for prismene gjelder for alle armeringsalternativene i hver serie. Som figuren viser, er det godt samsvar mellom referanselinjene til prismene fra 2019 og 2020 (kurver med svart markør). Referanselinjen for kubene fra 2020 er også ganske lik som disse linjene, men bøyer noe mer av etter ca. 300 døgn. Referanselinjen til kubene fra 2019 er også ganske like frem til 200 døgn der denne bøyer mer av blir noe lavere enn de andre. Dette til tross for at den usikre målingen i y-retning, som også ble diskutert i avsnitt 4.1.1, er sett bort ifra.

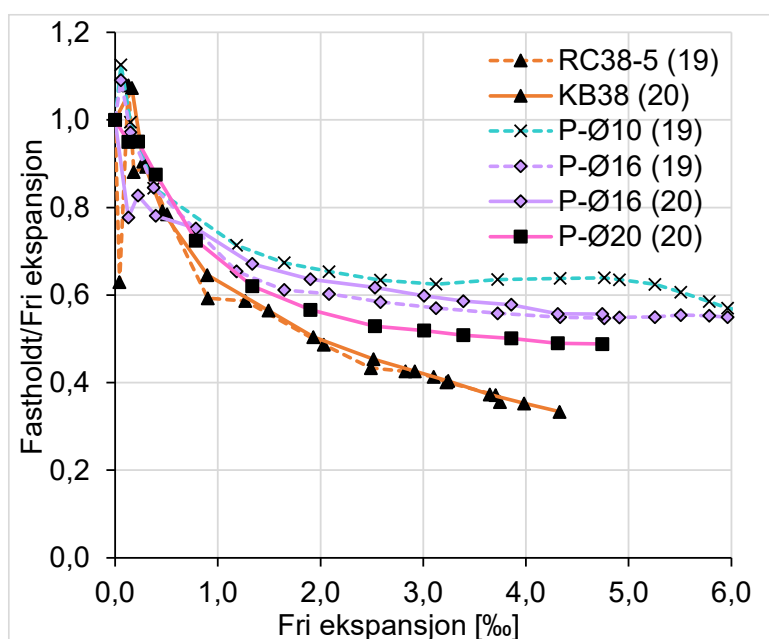


Figur 4-20: Referansekurver (fri ekspansjon) for kubene og prismene fra 2019 og 2020

Forhold mellom fri og fastholdt ekspansjon

Videre er forholdet mellom ekspansjonen i de fastholdte retningene til hver prøvetype og de frie ekspansjonene vist i figur 4-20 plottet i figur 4-21. De er her plottet mot de respektive frie ekspansjonene. Også i denne figuren er prøvene fra 2019 og 2020 vist med henholdsvis stiplede og heltrukne linjer. Merkingen for de ulike prøvetypene er lik som i tidligere figurer i dette kapittelet, der de fastholdte kubene er vist med oransje linje og trekantmarkør og prismene med 4Ø10-, 4Ø16- og 4Ø20 mm stenger er vist med henholdsvis turkise linjer med kryss-markør, lilla linjer med diamant-markør og rosa linjer med firkant-markør.

Som figuren viser holder ikke dette forholdet seg konstant for noen av prøvetypene, hverken der lasten er konstant eller øker med ekspansjonen. Hva som er velges som fri ekspansjon betyr som en skjønner mye for forholdet. Tidligere er det diskutert at det er mye spredning av resultatene i denne retningen, det er dermed flere usikkerhetsmomenter ved en betraktning som vist i figur 4-18, spesielt ved lave ekspansjonsnivåer der små forskjeller vil gi store utslag. Dette vises også på figuren da resultatene spriker noe frem til en fri ekspansjon på ca. 0,5 %. Som tidligere diskutert ble den belastede kubene fra 2019 av- og pålastet i starten på grunn av festing av strekkklapper. Dette er antagelig årsaken til droppet helt i starten for denne kurven. Ved en fri ekspansjon på 0,5 % er imidlertid forholdene mellom fri og fastholdt ekspansjon ganske like for alle prøvetypene og er på ca. 0,8 (20 % reduksjon). Etter dette begynner kurvene å sprike noe.



Figur 4-21: Fri/Fastholdt ekspansjon for de ulike prøvestykkene plottet mot sin respektive frie ekspansjon

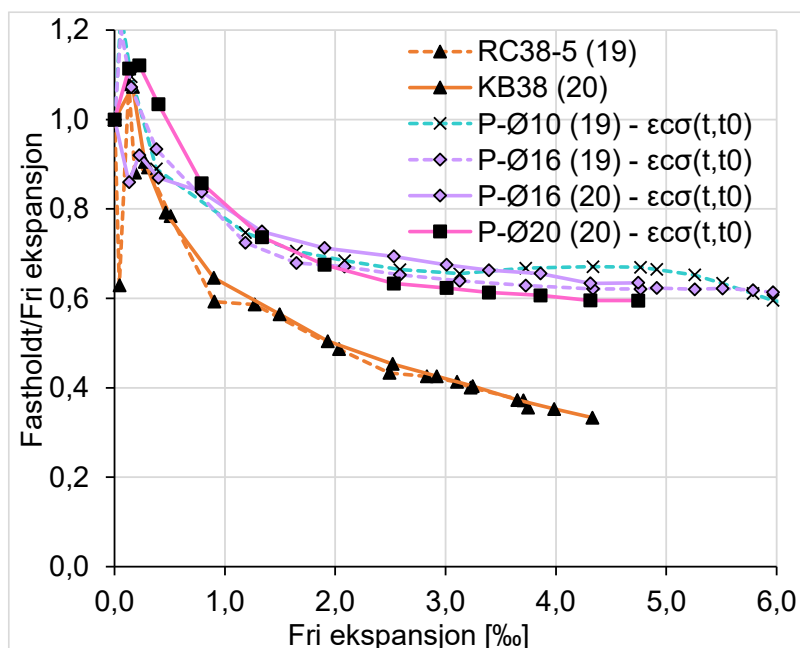
Kubene med konstant trykkspenning har nærmest en lineær reduksjon i belastet retning med den frie ekspansjonen. Dette stemmer med ekspansjonsmålingene da ekspansjonen til den belastede retningen begynner å flate ut etter ca. 200 døgn, mens den frie ekspansjonen fortsetter å øke. Den gjennomsnittlige ekspansjonen til kubene fra 2019 og 2020 i belastet retning er ca. lik, som man kunne se i figur 4-6. Som tidligere nevnt er den frie ekspansjonen fra 2019 noe lavere enn den fra 2020. Fordi forholdene blir plottet mot sin respektive frie ekspansjon blir kurvene imidlertid ganske like. Ekspansjonen til kubene i belastet retning har en reduksjon på

ca. 35 % ved en fri ekspansjon på 1 ‰ og ca. 50 % ved 2 ‰. Reduksjonen nærmer seg 60 – 70 % først ved store ekspansjoner (> 3,0 ‰).

Ekspansjonen til de armerte prismene i armeringsretningen reduseres også gradvis frem til en fri ekspansjon på ca. 2 ‰ hvor man kan se at kurvene begynner å flate noe ut. Dette stemmer også bra med ekspansjonsutviklingen da man kan se at ekspansjonen til prismene i armeringsretningen ikke flater ut på samme måte som kubens belastede retning. Reduksjonen av ekspansjonen i armeringsretningen for de armerte prisene er som nevnt ca. 20 % ved en fri ekspansjon på ca. 0,5 ‰ for alle armeringsalternativene. Ved videre ekspansjon får imidlertid prismene med større armeringsmengde en noe større reduksjon. Ved en fri ekspansjon på 2 ‰ er reduksjonen ca. 35 %, 40 % og 43 % for prismene med henholdsvis 4Ø10, 4Ø16 og 4Ø20 mm stenger. Ved frie ekspansjoner > 2 ‰ er reduksjonen til prismene med 4Ø10 mm tilnærmet konstant, mens prismene med 4Ø16 og 4Ø20 mm fortsatt får en gradvis reduksjon frem til en fri ekspansjon på ca. 4 ‰ hvor også disse forholdene flater ut. Reduksjonen er da ca. 45 % og 50 %.

Ved ekspansjoner større enn 5 ‰ ser prismene med 4Ø10 mm stenger ut til å få en større reduksjon og nærmer seg samme reduksjon som prismene med 4Ø16 mm. Ut fra ekspansjonskurvene vist i figur 4-8 skyldes dette at prismene med 4Ø10 mm stenger på dette nivået ser ut til å flate ut i armeringsretningen (også ganske flat i tverretningen), mens prismene med 4Ø16 mm ser ut til å fortsette å ekspandere i begge retninger. Dette kan skyldes mye opprissing på overflatene på disse prismene ved så høye ekspansjonsnivå, som er godt over det som er realistisk for virkelige konstruksjoner. Figur 4-21 viser at kurvene for prismene med 4Ø16 mm stenger fra de to ulike labseriene er ganske like fra en fri ekspansjon på ca. 0,8 ‰ for begge lab-seriene. Kurven fra 2020 ligger noe høyere (har en noe mindre reduksjon av ekspansjon) enn kurven fra 2019, noe som stemmer med ekspansjonen i den frie retningen som er noe mindre i 2020-serien, som vist i figur 4-20. Ekspansjonsutviklingen i armeringsretningen for de to seriene er tilnærmet lik som vist i figur 4-12.

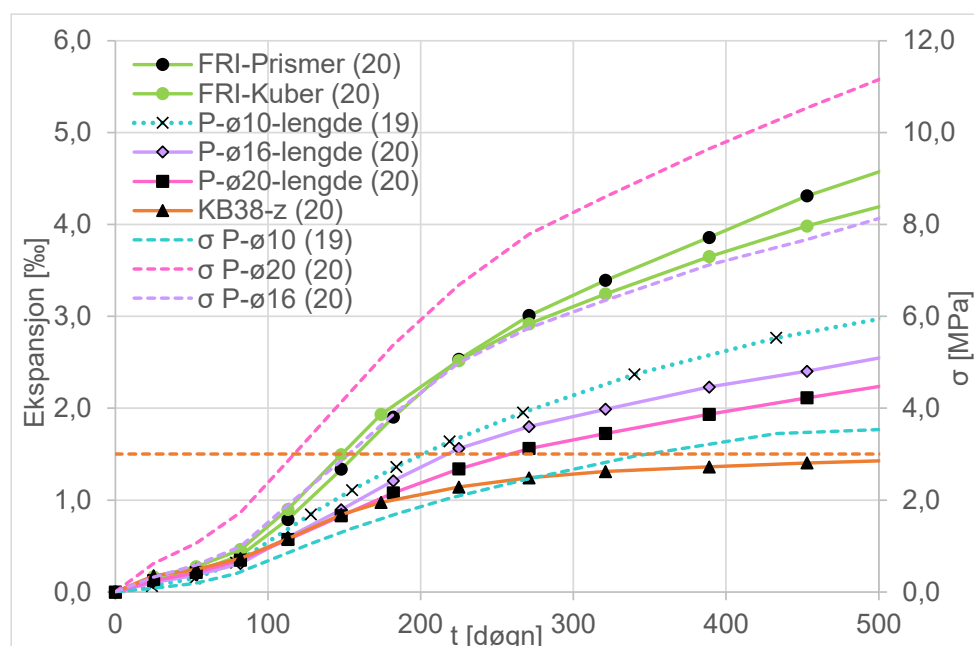
Figur 4-21 viser forholdene mellom fri og fastholdt ekspansjon basert på de målte tøyningene i armeringsretningen til prismene uten å trekke fra de beregnede kryptøyningene vist i avsnitt 4.2.2. I figur 4-22 er de samme forholdene plottet, der disse er trukket ifra. Kurven for de belastede kubene er lik som i figur 4-21. Som figuren viser vil forholdene til de armerte prismene bli enda lavere sammenlignet med de belastede kubene, også ved lavere ekspansjonsnivå (ca. 0,5 ‰). Forskjellen mellom forholdene til prismene med de ulike armeringsalternativene blir også mindre og er henholdsvis 34,4-, 36- og 38 % for en fri ekspansjon på 3 ‰ for prismene med 4Ø10, 4Ø16 og 4Ø20 mm stenger.



Figur 4-22: Fri/Fastholdt ekspansjon trukket fra spenningsavhengige tøyninger, $\varepsilon_{c\sigma}(t,t_0)$, for de ulike prøvestykkene plottet mot sin respektive frie ekspansjon

Disse resultatene viser at når og hvordan trykkspenningen blir påført prøvestykkene har mye å si for hvor mye ekspansjonen i fastholdt retning blir redusert. For å beskrive dette nærmere er ekspansjonen i de frie retningene til kubene og prismene vist i figur 4-20 plottet sammen med ekspansjonen i fastholdt retning som en funksjon av tiden i figur 4-23. I samme figur er de tilhørende trykkspenningene i betongen for de ulike prøvestykkene også plottet som en funksjon av tiden. Det er kun prøvestykkene fra 2020 som vises, med unntak av prismet med 4Ø16 mm stenger fra 2019. Merkingen av linjene er de samme som i figur 4-20 og 4-21 og merkingen av trykkspenningene er lik som for de tilhørende ekspansjonene bare med stiplede linjer. For ekspansjonen er y-aksen til venstre i grafen, mens for trykkspenningen er den til høyre. Det er vist målinger frem til 500 døgn hvor den frie ekspansjonen til kubene og prismene er henholdsvis ca. 4,2 og 4,6 ‰.

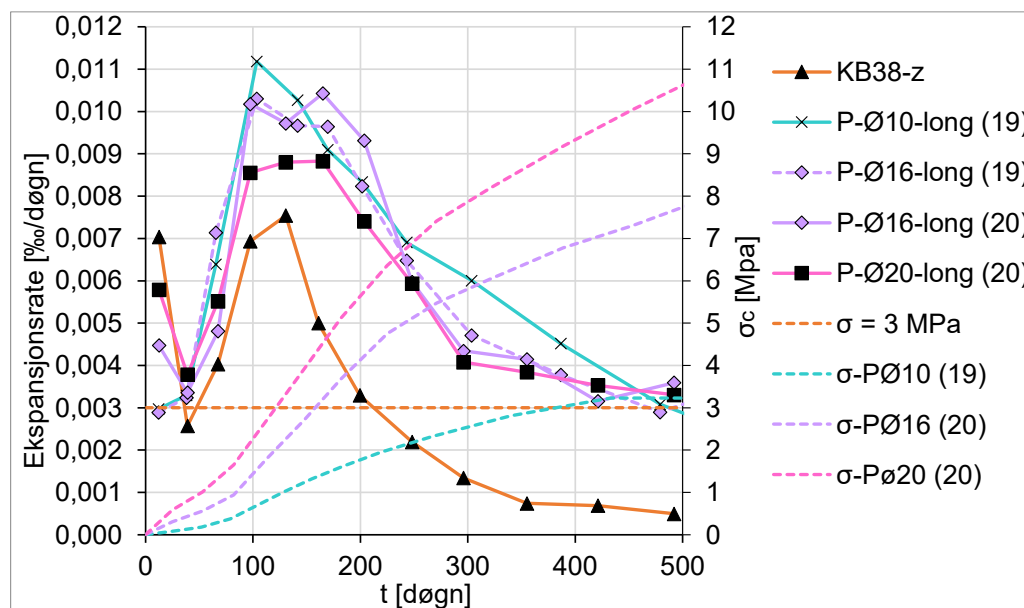
Figur 4-23 viser at ekspansjonen i fastholdt belastet retning er tilnærmet like for de den belastede kubene og de armerte prismene frem til målingen ved ca. 130 døgn. Den frie ekspansjonen er her ca. 0,8 ‰. Ved neste punkt ved 150 døgn er ekspansjonen til prismet med 4Ø10 og 4Ø16 mm stenger litt høyere. Spenningene i disse prismene er da henholdsvis ca. 1,5 og 3 MPa, sistnevnte likt som i den belastede kubene. Prismet med 4Ø20 har lik ekspansjon som den belastede kubene også ved neste punkt/måling (ved ca. 180 døgn). Spenningen i dette prismet er da ca. 5 MPa. Videre fra dette punktet (fri ekspansjon ≈ 2 ‰) begynner kurven til den belastede kubene å flate mer ut sammenlignet med kurvene til de armerte prismene. Dette skjer selv om både prismet med 4Ø16- og 4Ø20 mm stenger har oversteget spenningen i kubene på 3 MPa. Selv med økende trykkspenninger opp mot 3 ganger så høye som i kubene fortsetter prismene å ekspandere mer enn kubene. Med så store spenninger i prismene er det ikke helt logisk at disse ekspansjonene, i likhet med kubene, ikke flater mer ut.



Figur 4-23: Utvikling av ekspansjon og trykkspenninger for kuber og prismer

For 2019-serien flater den frie ekspansjonen til kubene også mer ut enn prismene. Det kan derfor være at denne kuben stoppet å ekspandere på et tidligere tidspunkt enn prismene. Årsaker til dette kan være forskjell i dimensjon, leaching og innsetting på ulike tidspunkt i 38 °C-rommet. Dette ser imidlertid ikke ut til å stemme med resultatene fra 2020 da de frie ekspansjonene er ganske like, selv om den frie ekspansjonen til kuben går fra å være større enn den frie ekspansjonen til prismene til å gradvis bli litt mindre etter målingen ved ca. 225 døgn.

Den største reduksjonen av forholdet mellom fri og tilbakeholdt ekspansjon for prismene kommer på tidspunktet før 2 ‰ fri ekspansjon som vist i figur 4-18. Det vil si før 200 døgn. Dette er også i det tidsrommet ekspansjonshastigheten er på sitt største (se avsnitt 4.4). For å se litt nærmere på dette forholdet er ekspansjonshastigheten til de fastholdte retningene av de ulike prøvestykkene, der også kryptøyningen til de armerte prismene er tatt hensyn til plottet sammen med utviklingen av trykkspenningene tilsvarende som i figur 4-23 i figur 4-24. Beskrivelsen av de ulike kurvene er lik som i figur 4-23.



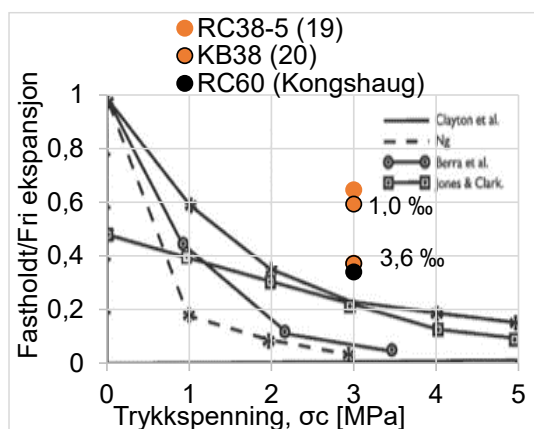
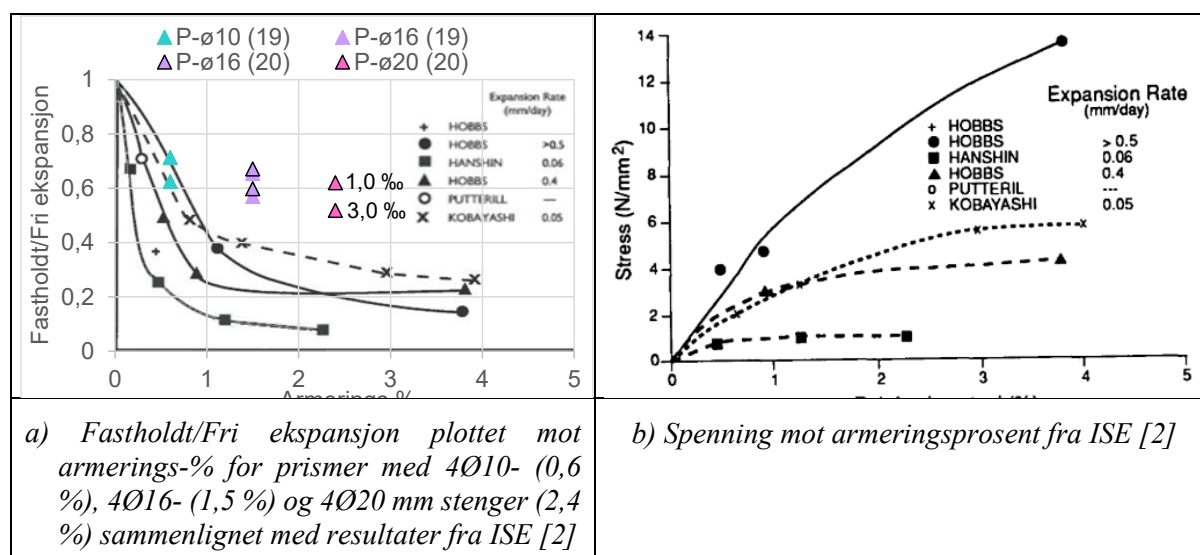
Figur 4-24: Ekspansjonshastighet av de fastholdte retningene på kuber og prizmer, der kryptøyningen, $\varepsilon_{sc}(t,t_0)$, er tatt hensyn til for de armerte prismene sammen med utviklingen av trykkspenningene i betongen

Som beskrevet i avsnitt 4.1.4 kan droppet fra 1. til 2. måling skyldes at en da er i et tøyingsområde hvor det bygger seg opp indre strekkspenninger i pastaen som da klarer å bremse ekspansjonen ganske mye inntil strekkspenningene blir så store at det begynner å bli riss i pastaen. Fra dette punktet begynner kurvene for de armerte prismene og den belastede kuben å skille seg. Som figur 4-24 viser er trykkspenningene på dette tidspunktet mye større for den belastede kuben enn for de armerte prismene. Den første store forskjellen på kurvene til ekspansjonshastigheten i fri og fastholdt retning kommer etter 100 døgn (mellom punkt 4 og 5 i figur 4-15). Den frie ekspansjonen er da ca. 0,5 ‰. Som figur 4-24 viser er det også her de største forskjellene mellom de armerte prismene og den belastede kuben er når kryptøyningen er tatt hensyn til. Trykkspenningen i de mest armerte prismene begynner nå å bli ganske tilsvarende som for de belastede kubene. Videre fra dette punktet reduseres også ekspansjonshastigheten til de belastede kubene mye mer enn de armerte prismene, som videre oppfører seg ganske likt selv om det er store forskjeller i spenningene. En teori er derfor at det er trykkspenningene i en tidlig fase av ekspansjonen betyr mest for hvor stor reduksjonen av ekspansjonen blir i belastet retning.

Som beskrevet i flere undersøkelser [1, 32] utvikler AR skaden seg først ved gel-utvikling i sonene mellom tilslag og sementpastaen, hovedsakelig langs svake plan og eksisterende mikroriss i tilslagene. Videre fører dette til en progressiv opprissing inne tilslagspartiklene med rissutvikling i pastaen (med gel) ved økende ekspansjoner. Fra disse resultatene kan det virke som at det spesielt er utviklingen av riss i tidlig fase og riss i pastaen som blir forhindret for de belastede kubene med en initiell trykkspenning. Dette er også observert i tidligere undersøkelser [11]. Det kan også tenkes at prismene uten spenning tidlig i ekspansjonsforløpet kan etablere mikroriss i mer vilkårlige retninger sammenlignet med kuben som er belastet fra starten og som dermed vil få mest opprissing i retningen parallelt med belastingen. Generelt er det slik at det er lettere for et allerede eksisterende riss å utvikle seg enn det er å utvikle ett nytt

riss. Ved videre ekspansjon kan det da tenkes at siden rissene i prismene allerede er initiert, vil de fortsette å utvikle seg selv om trykkspenningene etter hvert blir store. Dette kan derfor delvis også forklare at det ikke er så stor forskjell på de ulike armeringsmengdene. Små forskjeller i ekspansjon for ulike armeringsmengder er også observert i andre undersøkelser [12]. Disse forholdene er nærmere diskutert i [16].

I figur 4-25 er forholdet mellom ekspansjonene i fasthold og fri retning for de ulike prøvene sammenlignet med tidligere undersøkelser fra Institute of structural engineers (ISE) [2]. Figur 4-25a) viser forholdet mellom fri og fastholdt ekspansjon for de armerte prismene avhengig av armeringsprosent. Forholdene er vist ved en fri ekspansjon på ca. 1- og 3 ‰, som er etter henholdsvis ca. 130 og 250 døgn, da størrelsen på reduksjonen i fastholdt retning er avhengig av når i ekspansjonsforløpet forholdet beregnes, som vist i figur 4-21. Forholdene er her vist med trekantede markører i turkis, lilla, og rosa for prismene med henholdsvis 4Ø10 ($A_s/A_c = 0,6\%$), 4Ø16- ($A_s/A_c = 1,5\%$) og 4Ø20 mm stenger ($A_s/A_c = 2,4\%$). Resultatene til prismene fra 2020 er markert med svart linje rundt markøren. Det er her resultatene uten å ta hensyn til kryptøyningene (figur 4-21) som er vist for å sammenligne resultatene med de tidligere undersøkelsene, der dette ikke er tatt hensyn til.



c) Fastholdt/Fri ekspansjon plottet mot trykkspenning for kuber med 3 MPa sammenlignet med resultater fra ISE [2]

Figur 4-25: Resultater fra denne undersøkelsen sammenlignet med resultater fra ISE [2]

Som vist i figur 4-21, har prismene med 4Ø16 mm stenger omtrent samme reduksjon for begge seriene. Reduksjonen av forholdet mellom prismene med 4Ø10 og 4Ø16 mm stenger er også ganske lik som reduksjonen av forholdet mellom 4Ø16 mm og 4Ø20 mm. Reduksjonen blir dermed lineær mellom disse punktene. Denne sammenhengen skiller seg fra resultatene i litteraturen som viser en mye større reduksjon av ekspansjonen ved høyere armeringsprosjenter. Reduksjonen av ekspansjonen ved en armeringsprosjent på 2,4 % fra denne undersøkelsen er ca. 50 % (for en fri ekspansjon på 3 ‰) mens de tilsvarende verdiene for kurvene fra litteraturen er ca. 70-90 % (ukjent fri ekspansjon). De av disse kurvene med størst reduksjon har imidlertid en svært høy ekspansjonshastighet. Ekspansjonshastigheten for prismene i denne undersøkelsen ($<0,02$ mm/m/day) er også under halvparten av ekspansjonshastigheten til den kurven som viser minst reduksjon av ekspansjonen ved dette spenningsnivået i de tidligere undersøkelsene. Variasjoner i lagringsbetingelser, betong-mix og tilslag vil også påvirke resultatene. Spenningsnivåene til kurvene fra litteraturen mot armeringsprosjent er vist i figur 4-19b). ISE [2] beskriver ekspansjonsnivåene fra laboratorieundersøkelsene som høye, og at effekten av fastholding i en virkelig konstruksjon (der ekspansjonsraten er mye mindre) er forventet å være mindre. Det er imidlertid ikke nevnt hvilken ekspansjon verdiene til prøvene er hentet fra.

Figur 4-25c) viser forholdet mellom fri og fastholdt ekspansjon for den belastede kuben plottet mot en konstant trykkspenning på 3 MPa. Forholdene er her plottet med oransje data-punkt og resultatene fra 2020 er også her vist med svart kant. Resultatene fra Kongshaug et al. [14] for en tilsvarende kube som også er belastet med 3 MPa er også vist med svart data-punkt. I likhet med prismene i figur 4-19a) er også disse resultatene vist for en fri ekspansjon på 1 og 3 ‰, mens prøven fra Kongshaug er ved den endelige ekspansjonen ved 3,6 ‰. Forskjellen mellom disse nivåene er som tidligere diskutert større for kubene enn for prismene. Kubene viser imidlertid også her en noe mindre reduksjon av ekspansjonen enn kurvene fra litteraturen, henholdsvis 60 % (for en fri ekspansjon på 3 ‰) sammenlignet med 80-90 % (ukjent fri ekspansjon). Resultatene fra [14] samsvarer med resultatene fra denne undersøkelsen, noe som bekrefter at forholdet er likt for en prøve med samme betongmiks, men som er lagret ved 60 °C.

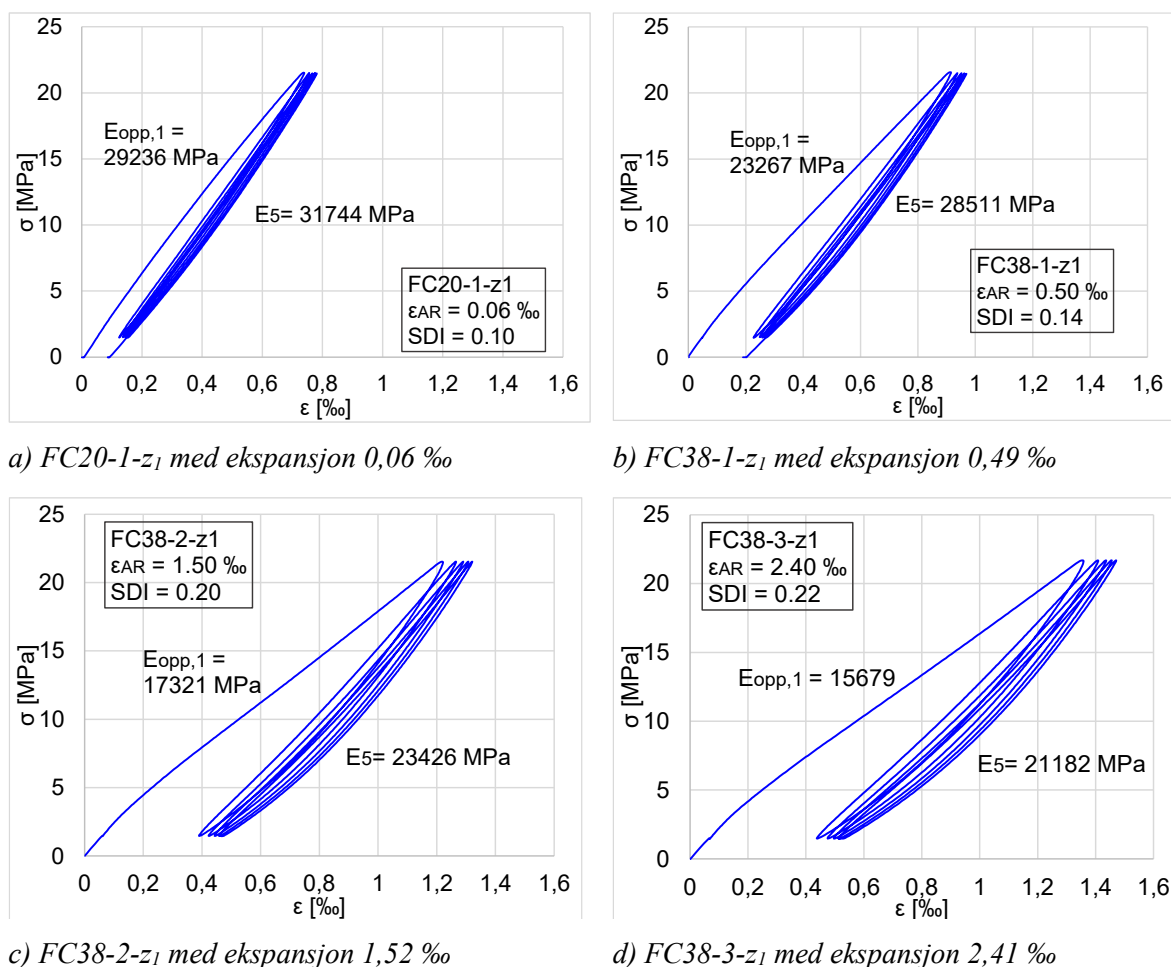
Det er imidlertid usikkerheter i forhold til hvor representative disse resultatene er i forhold til eksisterende konstruksjoner med varierende temperatur og fuktforhold sammenlignet med akselererte laboratorieforsøk. Som tidligere diskutert er det også usikkerheter i forhold til hvordan trykkspenningene overføres til prøvene og om noen overflate effekter kan forstyrre den målte ekspansjonene på disse små prøvene, eller om stålplatene på endeflatene er stive nok til å fordele trykkspenningene jevnt i hele prøvestykket. Videre undersøkelser er derfor nødvendig.

5. MATERIALEGENSKAPER

5.1 Resultater fra SDT

Tabell F-1, F-2, F-3 og F-4 i vedlegg F viser ulike resultater fra SDT av kjerner fra henholdsvis 2019-kuber, 2020-kuber, 2019-prismer og 2020-prismer. I tabell F-1 er også resultater fra tilsvarende prøving av støpte Ø150x300 mm sylindere inkludert. Resultatene som er vist er sekant E-modulen ved på- og avlasting av sykel en og fem, SDI, SDI₂, alternativ SDI (SDI_{alt}), tøyningen ved maks last på første lastsykel ($\epsilon_{topp,1}$), PDI og NLI. Lastnivået i % av trykkfasthet er også gitt. Ekspansjonen til de borede kjernene er lik den målt på overflaten til de tilhørende kubene og prismene i boreretning. For de støpte sylindrene er ekspansjonen lik den målt i prøvenes lengderetning.

Figur 5-1 viser spennings/tøyningskurvene fra SDT til prøve FC20-1-z₁ fra kube FC20-1 lagret ved 20 °C i 90 døgn (ekspansjon 0,06 ‰) og prøvene FC38-1-z₁, FC38-2-z₁ og FC38-3-z₁ fra kuber lagret ved 38 °C i henholdsvis 90, 140 og 270 døgn (ekspansjon 0,49, 1,52, 2,41 ‰). Alle prøvene er fra kuber uten belastning. Som figuren viser er det betydelig forskjell på tøyningene og hystereserealene ved økende ekspansjon.

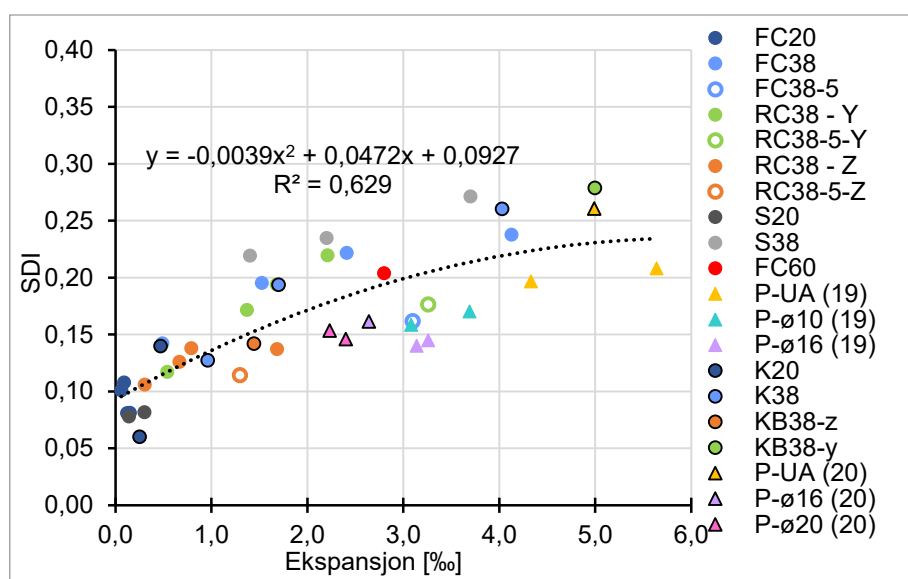


Figur 5-1: Spennings-tøyningskurver fra SDT test med økende ekspansjon fra a) til d)

Skadeparametere fra SDT; E_5/E_{ref} , SDI, SDI2, SDI_{alt}, $E_{opp,1}/E_5$, $\varepsilon_{topp,1}$, NLI og PDI, er vist i tabell F-5 til F-6 i vedlegg F for prøver fra henholdsvis 2019 og 2020. For kubene og de støpte sylindrene er gjennomsnittsverdien av to prøver vist, mens det for prismene kun er resultatet fra én prøve (boret i armeringsretningen) som er vist. Spredningen mellom verdiene til de to prøvene er som vist i tabell F-1 til F-4, lav. Reduksjonen av E-modul (E_5/E_{ref}) er gitt som gjennomsnittlig sekant E-modul av femte av- og pålastning ($E_{opp,5}$ og $E_{ned,5}$) delt på en referanse E-modul. Referanse E-modulen til prøvene fra 2019 er basert på den gjennomsnittlige sekant E-modulen fra den femte sykkelen fra prøvene lagret ved 20 °C. Ekspansjonen til disse prøvene er lave og reduksjonen av E-modulen (pga. ekspansjonen) er derfor også lav. Den gjennomsnittlige E-modulen av denne sykkelen for disse kubene økte fra 31500 MPa til 34000 MPa fra en alder på 120 døgn til omtrent 425 dager. Den gjennomsnittlige E-modulen til de støpte sylindre lagret ved 20 °C var omtrent 34000 MPa ved både første og fjerde termin. Økningen var ganske uniform med alder for kubene lagret ved 20 °C. Denne økningen er forventet å gå fortere for prøvene lagret ved 38 °C, så referansen er valgt til 34000 MPa som et gjennomsnitt for hele test perioden av prøvene fra 2019. Referanseprøvene fra 2020 gir en E-modul lik ca. 32000 MPa. Denne verdien er også i samsvar med EC2, der en forskjell i fasthet på ca. 10 MPa gir en forskjell på E-modul lik 2000 MPa.

5.1.1 Stiffness Damage Index (SDI)

I figur 5-2 er alle SDI-verdiene til de ulike prøvestykkene (gjennomsnittet av to prøvestykker), vist i tabell F-5 og F-6 i vedlegg F, plottet mot ekspansjonen i test-retningen. Verdiene fra kubene og Ø150x300 sylindrene er vist med sirkulære data-punkt, mens verdiene fra prismene er vist med trekantede markører. Resultater fra 2020 er markert med svart kant rundt markørene. Forklaringen til de ulike prøvene, er vist i figuren. SDI-verdiene til de ulike prøvestykkene ser ut til å øke ganske lineært med ekspansjonen frem til en ekspansjon på ca. 2 ‰, der de ser ut til å flate ut. Resultatene er mer samlet for lave ekspansjoner, men får større spredning når ekspansjonen blir høyere.



Figur 5-2: SDI-verdier fra kuber, prismer og støpte sylindere fra 2019 og 2020 plottet mot ekspansjon

Kjernene fra kubene ved femte termin (FC38-5 og RC38-5), vist med blå, grønne og oransje markører uten fyll, har både lavere ekspansjon og lavere SDI enn kjernene til kubene fra fjerde termin (FC38-4 og RC38-4) selv om de ble lagret lenger ved 38 °C (594 vs. 426 døgn). Kubene fra femte termin ble videre lagret i 197 døgn ved 20 °C (under samme fuktforhold) før de ble testet, som muligens kan ha påvirket prøvene (ekspansjonen utviklet seg i underkant av 0,2 ‰). En lignende tendens kan også sees på resultatene til prismene fra 2019 (trekantede data punkt uten svart kant) som ble lagret i 1100 døgn ved 38 °C og som får ganske lave SDI-verdier i forhold til andre prøver med samme ekspansjonsnivå. En årsak kan være at den målte ekspansjonen på overflatene er høyere enn ekspansjonen i kjernen for prøvestykker med høyere ekspansjon der større riss på overflaten er observert, noe som gjør at disse resultatene er forskjøvet lengre til høyre i figuren. Et riss på ca. 0,1 mm gir en tøyning på ca. 0,5 ‰ over en målelengde på 200 mm, og plasseringen av rissene i forhold til målepunktene vil derfor kunne gi store utslag. En annen teori kan være at de skjer noe med reaksjonsproduktene over tid slik at gelen endrer egenskaper og blir stivere. I [13] ble det for eksempel diskutert at kalsium rik gel først og fremst er observert et stykke vekk fra tilslagene, som antyder at reaksjonsproduktene kan være annerledes senere i reaksjonsforløpet hvis den initielle reaksjonen oppstår i og rundt tilslagene. Noe litteratur diskuterer også en slags "self-healing" effekt ved at riss o.l. blir fylt med reaksjonsprodukt, slik at betongen da får en stivere oppførsel [23, 32, 33]. En slik effekt kan også bidra til at skadegraden flater ut ved høye ekspansjoner for alle prøver. Dette er nærmere diskutert i [16]. Denne effekten er imidlertid vanskelig å undersøke og fastslå. En polynomisk regresjonslinje er lagt inn i figuren. Korrelasjonskoeffisienten er lav ($R^2 = 0,69$) da resultatene har høy spredning.

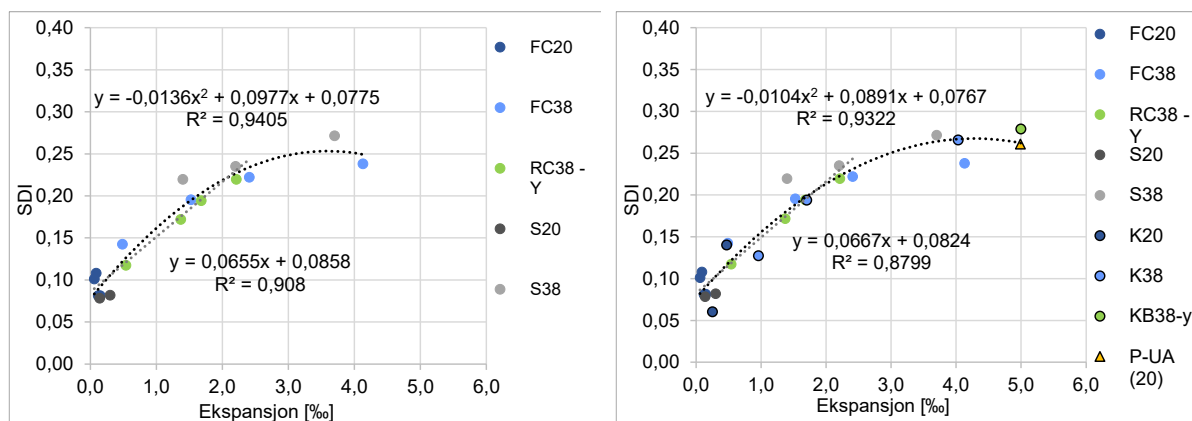
Prøvene med en form for fastholding er markert med oransje, turkise, lilla og rosa markører og representerer henholdsvis de fastholdte kubene og prismene med 4Ø10, 4Ø16 og 4Ø20 mm stenger. Disse ligger lavere enn de frie prøvene ved samme ekspansjonsnivå ved ekspansjoner over 1 ‰. En årsak kan være mindre opprissing i retningen normalt på disse prøvene i forhold til frie prøver som igjen fører til en lavere skadegrad på prøvesylindrene selv om ekspansjonen er lik. Tidligere undersøkelser av Gautam et al. [11] har diskutert at en fastholding ikke vil hindre at reaksjonen forekommer, men at den vil hindre opprissing/ekspansjon. Strukturanalyser fra samme undersøkelse viste også at det spesielt var en reduksjon av opprissing i pastaen for prøver med belastning. Prismene fra 2019 ble som tidligere nevnt lagret ekstra lenge (1100 døgn ved 38 °C), noe som også kan ha påvirket disse prøvene. Prøvene fra kubene i fastholdt retning ved ekspansjoner >1 ‰ (oransje markører) har også en høyere alder enn de prøvene fra frie retninger ved samme ekspansjonsnivå. Skadegraden og opprissingen til disse prøvene ved samme ekspansjonsnivå trenger derfor ikke være lik selv om ekspansjonen er det. De frie prøvene er for eksempel i en fase der ekspansjonen øker raskt (se Figur 4-13) og mange nye mikro-riss etableres, mens det for de fastholdte prøvene med en høyere alder er i en fase der den økte ekspansjonen i større grad er pga. utvikling av eksisterende riss. Verdiene til de tilsvarende prøvene fra 2020 som ikke var lagret like lenge (531 døgn ved 38 °C) er imidlertid også godt under kurven selv om disse ligger noe nærmere (høyere SDI og lavere ekspansjon). Prøven fra det uarmerte prismet fra denne serien stemmer ganske godt med verdiene til de frie retningene på kubene. Prøvene til prismene fra 2019 viser også at en høyere belastning/armeringsmengde gir en mindre skade ved samme ekspansjon hvis man

sammenligner den turkise og lilla trekant-markøren ved samme ekspansjon. Disse prøvene er plottet mot den målte ekspansjonen som også inneholder et visst kryp og elastisk deformasjon. Prøvene blir imidlertid avlastet når de blir boret ut. Ved å trekke fra den beregnede kryptøyningen vist i figur 4-18 får prøvene da en økt ekspansjon på 0,15, 0,4 og 0,5 ‰ for prismene med Ø10, Ø16 og Ø20 mm armering, slik at disse data-punktene derfor hører til lengere til høyre i figur 5-2. Det er imidlertid flere usikkerheter knyttet til ekspansjonen i denne retningen. Fra vedlegg D figur D-44 til D-46 kan en også se flere ganske grove overflateriss parallelt med armeringsretningen som også krysser noen av målelinjene i denne retningen, som, som tidligere nevnt, kan gi ganske store utslag på den målte ekspansjonen på overflatene.

Noe litteratur viser større skade på prøver tatt ut på tvers av en belastning. Prøvene boret på tvers av belastningen på de belastede kubene (RC38-Y - grønn markør) ser imidlertid her ut til å gi ganske like resultater som prøvene fra de frie kubene (blå markører) ved like ekspansjonsnivå. Dette tyder på at det først og fremst er skadenivået i lastretningen til prøven som har betydning for SDI-verdiene. Dette er et viktig resultat i forhold til prøver fra eksisterende konstruksjoner der ekspansjonen på tvers av en prøve kan være ganske forskjellig på grunn av ulik armeringsmengde.

Det er litt forskjell mellom 20 °C -prøvene når det gjelder type prøve (støpt eller utboret sylinder) og serie (2019 eller 2020). Resultatene fra Ø150x300 mm sylindrene stemmer bra med resultatene fra de frie kubene. Det er imidlertid en liten tendens til at de ligger noe høyere i skadegrad ved samme ekspansjon (unntatt for 20 °C-prøvene som ligger litt lavere). Det at de er testet som de er uten at noen prøvesylinder er boret ut og at de har en større størrelse ser derfor ut til å ha en viss påvirkning. 20 °C-prøvene ser ut til å ligge litt lavere enn snittet. Det er imidlertid en usikkerhet knyttet til målt ekspansjon på disse prøvene som nevnt i avsnitt 4.1.2. Kuben lagret ved 60 °C ligger også noe lavere enn de tilsvarende prøvene. Den høye temperaturen kan ha påvirket oppførselen til denne prøven noe.

Sammenhengen mellom SDI-verdiene og ekspansjonene til de frie prøvene (enten støpte sylindre eller sylindre boret fra frie kuber/uarmerte prismer eller i fri retning fra belastede kuber/armerte prismer) ser ut til å være ganske god. I [5] ble disse verdiene for prøvestykkene fra de frie kubene og sylindrene fra 2019 benyttet til å estimere ekspansjonen fra kjerneprøver fra ulike deler av Elgeseter bru. Denne sammenhengen er gjengitt i figur 5-3a). Det ble her sett bort fra prøver fra den belastede kubene da prøver fra virkelige konstruksjoner også som regel er boret i fri retning. Prøven lagret ved 60 °C er også sett bort ifra da den antagelig er påvirket av den høye temperaturen/reaksjonshastigheten. Verdiene til kubene fra femte termin, FC38-5 og RC38-5, og de uarmerte prismene er også sett bort ifra da disse resultatene blir sett på som noe usikre. Korrelasjonskoeffisient for en polynomisk regresjonslinje er her ganske god og lik 0,94. En lineær linje opp til en ekspansjon på ca. 2,5 ‰ er også vist og har en korrelasjonskoeffisient lik 0,90.



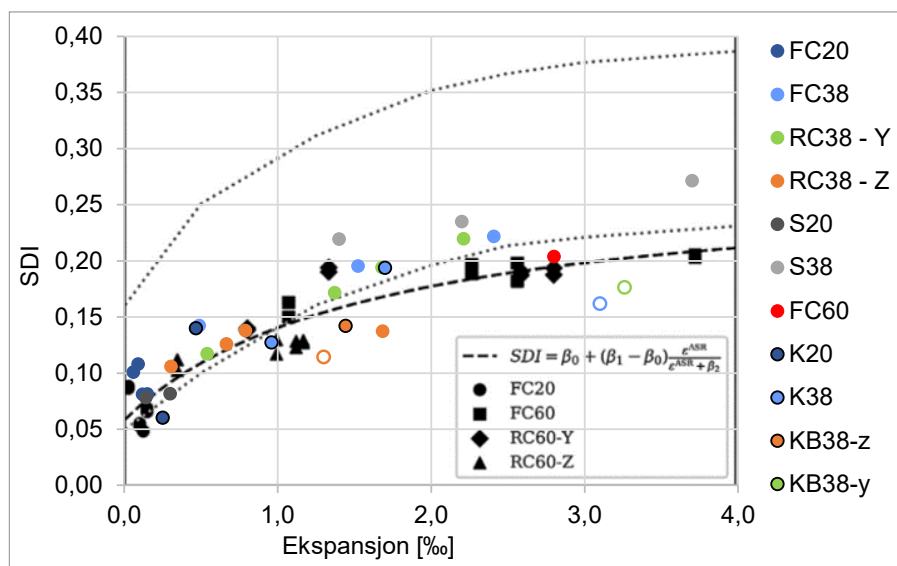
a) Prøver fra 2019 gitt i [5]

b) Samme resultat som i a) med prøver fra frie retninger på kuber og prismar fra 2020.

Figur 5-3: SDI-resultater fra frie retninger på kuber og sylindere plottet mot ekspansjon med tilhørende lineære og polynomiske regresjonslinjer

I figur 5-3b) er tilsvarende verdier vist med verdiene fra de frie prøvene fra 2020. Fra denne serien er det uarmerte prismet tatt med. Relasjonene er også her gode, med en korrelasjonskoeffisient på henholdsvis 0,93 og 0,88 for en polynomisk og lineær (opp til 2,5 ‰ ekspansjon) regresjonslinje. Det ser ikke ut til å bety noe relasjonen at prøvene fra 2020 er støpt med en lavere fasthet.

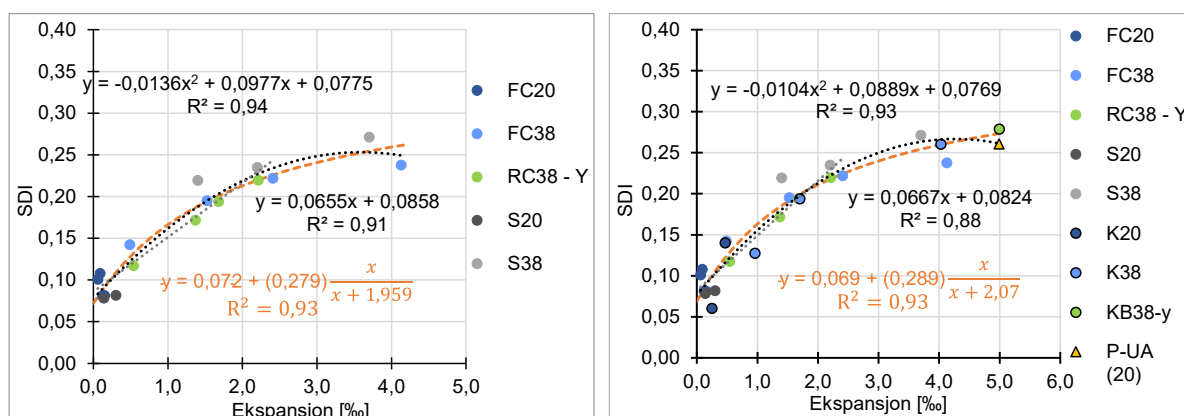
I figur 5-4 er alle resultatene fra kubene og sylindrene i denne undersøkelsen plottet sammen med resultatene fra Kongshaug et al. [14]. Her ble tilsvarende undersøkelser på tilsvarende kuber utført, men ved en lagringstemperatur på 60 °C. Lastnivået på prøvingen var imidlertid noe lavere enn i denne undersøkelsen. De to like grå stiplede linjene viser øvre og nedre grenseverdier av sammenhengene funnet i Sanchez et al. [32]. Sanchez testet mange ulike typer tilslag og betong-mixer og fikk en stor spredning i resultatene. Figur 5-4 viser at resultatene fra de frie prøvene fra denne undersøkelsen ligger noe høyere enn prøvene fra [14]. Dette gjelder spesielt ved høyere ekspansjoner (denne undersøkelsen har også data-punkt der ekspansjonen er > 4,0 ‰ som ikke er vist i denne figuren). Prøven som ble repetert ved 60 °C ser imidlertid ut til å stemme ganske bra med resultatene fra [14], noe som delvis bekrefter at temperaturen kan påvirke prøvene noe. Kongshaug et al. [14] fant også at de fastholdte/belastede prøvene (markert med svarte trekant markører) ligger noe lavere enn tilsvarende frie prøver ved samme ekspansjonsnivå. Også Kongshaugs resultater ser ut til å flate ut ved høyere ekspansjoner, men siden denne undersøkelsen består av færre prøvestykker får man ikke den samme spredningen.



Figur 5-4: SDI verdier fra kuber og sylindere plottet mot ekspansjonen sammen med resultater fra [14] ($R^2 = 0,88$), øvre og nedre grensekurver fra [32]

Figur 5-2 og 5-3 viser at en polynomisk regresjonskurve ikke nødvendigvis gir den beste sammenhengen for resultatene da den bøyer noe mer av (får en reduksjon mot slutten) enn det punktene tilsier, noe som ikke er helt sannsynlig. Kongshaug et al. [14] benyttet en regresjonsfunksjon fra Wen [34] som fortsetter å øke ved høyere ekspansjoner som vist i figur 5-4. Funksjonen er gjengitt i ligning 5-1. I figur 5-5a) og b) er denne funksjonen benyttet for resultatene fra prøvene i fri retninger vist i figur 5-3a) og b). Regresjonskurven er markert med oransje stiplet linje. Som figuren viser er det ikke stor forskjell fra den polynomiske funksjonen, men kurven vil ikke flate ut på samme måte ved slutten. Korrelasjonskoeffisienten, R^2 , for denne og den polynomiske funksjonen er som en ser ganske like, henholdsvis 0,93 og 0,94 for resultatene 5-5a) og 0,93 for begge i 5-5b). Dette viser at like prøver fra de to labseriene har lik oppførsel ved samme ekspansjonsnivå, til tross for en lavere fasthet på prøvene fra 2020.

$$SDI = \beta_0 + (\beta_1 - \beta_0) \frac{\varepsilon_{AR}}{(\varepsilon_{AR} + \beta_2)} \quad (5-1)$$

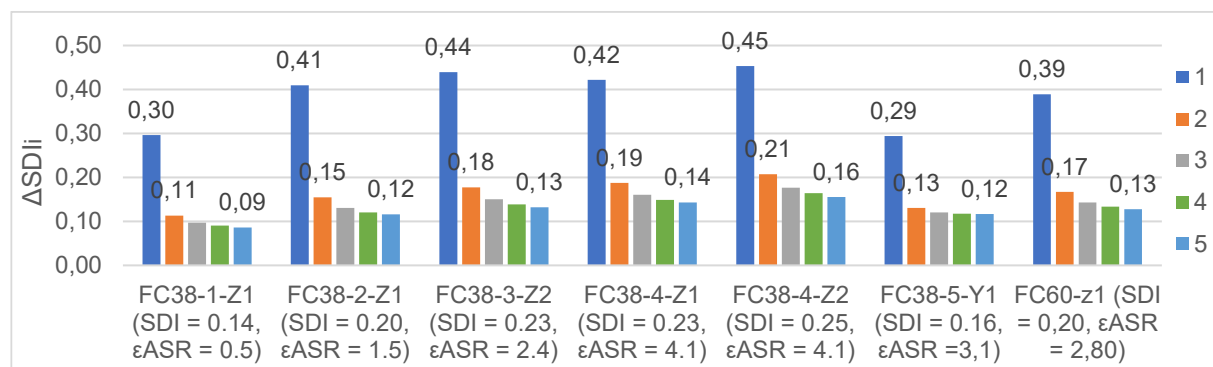


a) Prøver fra 5-3a): med kurve fra ligning 5-1

b) Prøver fra 5-3b) med kurve fra ligning 5-1

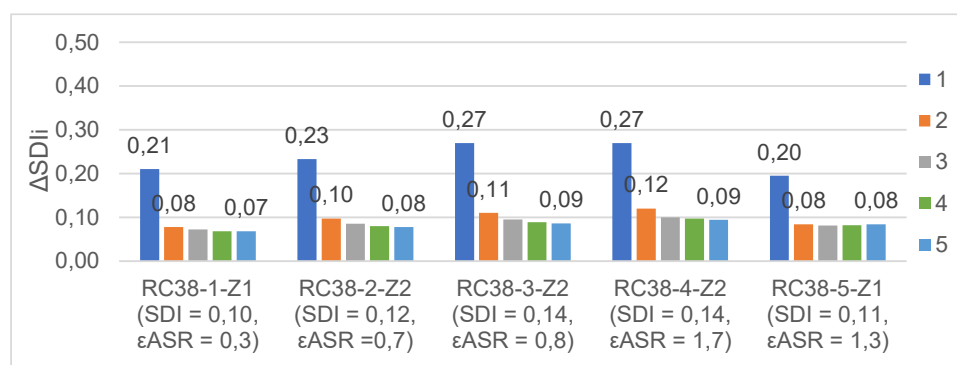
Figur 5-5: SDI verdier til prøver fra fri retninger plottet mot ekspansjonen (tilsvarende figur 5-3a) og b) og vist med regresjonsfunksjon fra [34] vist i ligning 5-1 markert i oransje

I figur 5-6 er bidragene til SDI-verdiene for hver sykel (ΔSDI_i) for utvalgte prøvestykker/kjerner ved ulike ekspansjonsnivå vist. Prøvestykkene er fra frie kuber fra 2019 lagret ved 38 °C (FC38) ved ekspansjonsnivåene 0,5- (FC38-1), 1,4- (FC38-2), 2,3- (FC38-3) og 4,1 % (FC38-4). Figuren viser at bidraget fra den første syklene, ΔSDI_1 , øker med økende ekspansjon opp til et nivå på 2,5 %, som er der hvor progresjonen av SDI kurvene vist i figur 5-1 til 5-4 bøyer av. Bidragene fra ΔSDI_2 - ΔSDI_5 ser imidlertid ut til å øke ikke bare opp til 2,4 %, men også fra 2,4 til 4,1 %. Kjernene FC38-3-z2 og FC38-4-z1 har samme SDI-verdi selv om de har ulikt ekspansjonsnivå; 2,4 % og 4,1 %. Hvis vi sammenligner disse prøvestykkene er ΔSDI_1 noe lavere ved en ekspansjon på 4,1 % enn ved 2,4 %, mens de andre ΔSDI -verdiene (ΔSDI_2 - ΔSDI_5) er høyere. For prøvestykket FC38-4-Z2, som har samme ekspansjon som FC38-4-Z1 og kun noe høyere SDI, 0,25 vs. 0,23, er bidragene til SDI fra alle syklene høyere enn for både FC38-3-Z2 og FC38-4-Z1. Dette viser at SDI-verdiene og del-bidragene fra hver sykel sammensvarer godt, men at forholdet mellom SDI og ekspansjon kan være bedre om kun noen av syklene er inkludert. Dette vil imidlertid avhenge av ekspansjonsnivået. Den første syklene, som antagelig lukker mange eksisterende riss i strukturen, er antagelig viktigst ved lave ekspansjonsnivå, men kan være mer sensitiv til andre effekter på høyere ekspansjonsnivå.



Figur 5-6: Forhold mellom forbrukt og påført energi i hver sykel (1-5) ved ulike SDI-verdier og ekspansjonsnivå for prøvestykker fra frie kuber fra 2019

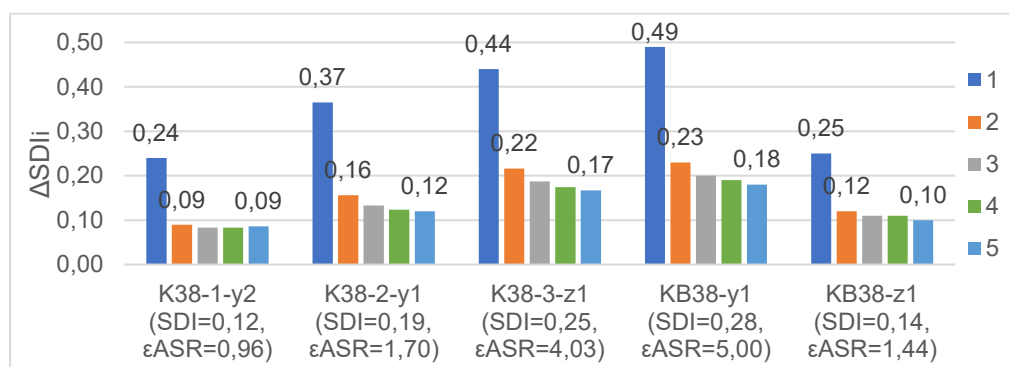
I figur 5-7 er samme sammenheng vist for belastede kuber i belastningsretning (z-retning) fra samme serie som i figur 5-6 (2019). Forholdet mellom de ulike syklene ser ut til å være likt som for de frie prøvene, men at bidragene til syklene er lavere. Figuren viser at bidragene fra de ulike syklene også er like for prøvestykke RC38-3-z2 og RC38-4-z2 som har lik SDI verdi, men ganske ulik ekspansjon. RC38-3-z2 har lik SDI som prøve FC38-1-z1, bidragene fra hver sykel er også i dette tilfellet ganske like, men at den fastholdte kubene ser ut til å ha et noe mindre bidrag fra første sykel.



Figur 5-7: Forhold mellom forbrukt og påført energi i hver sykel (1-5) ved ulike SDI-verdier og ekspansjonsnivå for prøvestykker fra belastede kuber fra 2019

Prøvestykkene fra kubene fra femte termin, RC38-5 og FC38-5, fikk som tidligere diskutert en lavere SDI enn forventet ut fra ekspansjonsnivået. Som figur 5-6 og 5-7 viser er bidragene til SDI-verdiene fra hver sykel for disse kjernene lavere enn fra andre kjerner med tilsvarende ekspansjonsnivå. Hvis man derimot sammenligner disse med prøvene fra første termin, FC38-1 og RC38-1, ser man at SDI-verdiene er ca. like, men at det er en tendens til at første sykel er mindre og de påfølgende syklene større for prøvestykkene FC38-5 og RC38-5. Prøven lagret ved 60 °C, FC60-z1, ser også ut til å ha et noe mindre bidrag fra første sykel og høyere bidrag fra de andre syklene sammenlignet med prøve FC38-2-z1 som har samme SDI.

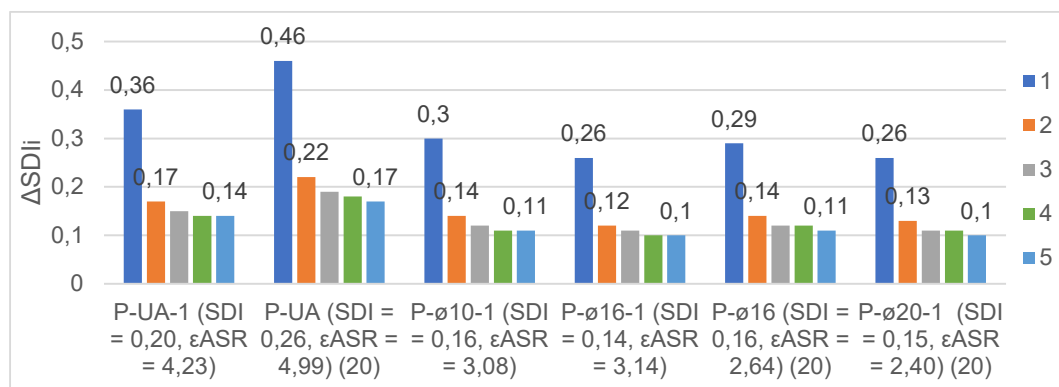
I figur 5-8 er samme sammenheng som i figur 5-6 og 5-7 vist for kubene fra 2020. Også her er forholdene like som vist i figur 5-5 for de frie prøvene. FC38-4-z2 og K38-3 og har både lik ekspansjon og SDI-verdi og bidragene fra hver sykel ser også ut til å være lik. Kjerne KB38-y1 som har høy SDI-verdi og ekspansjon har også en spesielt stor økning i den første syklene, sammenlignet med kjerne K38-3-z1. KB38-z1 (i belastet retning) med SDI-verdi lik 0,14 viser samme tendens som RC38-3-z2 som hadde en noe lavere verdi på første sykel sammenlignet med fri prøve FC38-1-z1 med samme SDI-verdi.



Figur 5-8: Forhold mellom forbrukt og påført energi i hver sykel (1-5) ved ulike SDI-verdier og ekspansjonsnivå for prøvestykker fra kuber fra 2020

I figur 5-9 er samme sammenheng vist for kjernene boret i prismenes lengderetning både fra 2019 og 2020. Figuren viser en tydelig forskjell mellom tilvarende kjerner fra de to seriene, der SDI-verdiene er høyere for alle syklene for kjernene fra 2020. Det uarmerte prismet fra 2019 (P-UA-1) ser ut til å ha en lik tendens som de belastede kubene og kubene fra femte termin fra 2019 ved at første sykel er mindre og de neste noe høyere sammenlignet med prøve FC38-2-

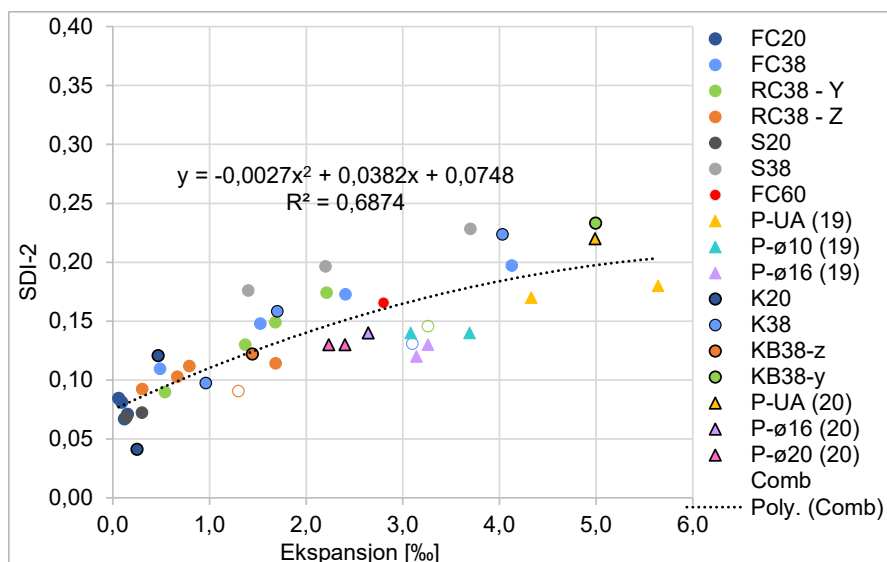
z1 (figur 5-6) som har lik SDI. Samtidig er SDI-verdien til kjerne P-UA-1 ganske lik kjerne K38-2-y1 fra 2020 som også har nesten samme SDI, men et mye lavere ekspansjonsnivå. Dette kan tyde på at det er den lange lagringstiden som er årsaken til at SDI-verdiene er lavere for prismene fra 2019. Tidligere ble det diskutert at det kan skje noe med reaksjonsproduktet, eller at det muligens «fyller» de groveste rissene. Disse effektene påvirker antagelig spesielt første sykel, slik at prøvene får en stivere oppførsel.



Figur 5-9: Forhold mellom forbrukt og påført energi i hver sykel (1-5) ved ulike SDI-verdier og ekspansjonsnivå for prøvestykker fra prismen fra 2019 og 2020

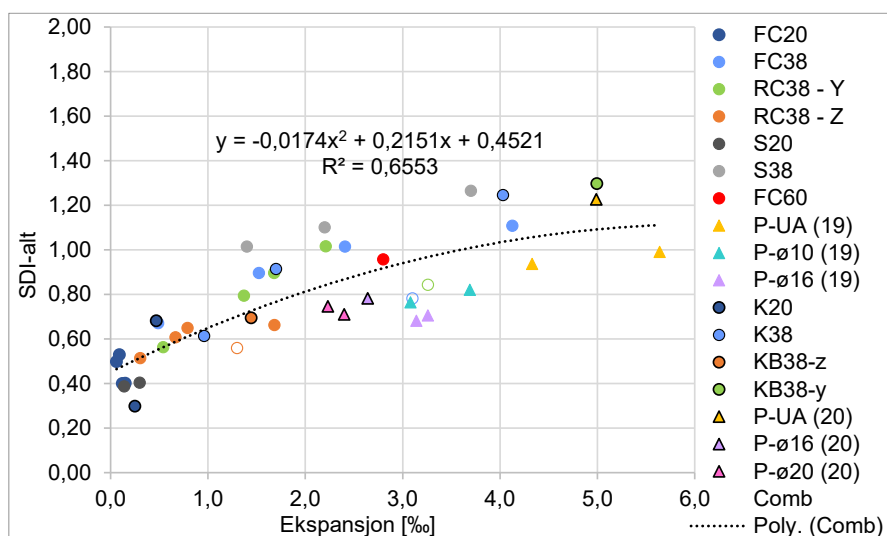
Alternative SDI-verdier

Resultatene fra figur 5-6 til 5-9 kan tyde på at det er spesielt den første syklens som blir påvirket (reduert) om prøven er belastet. Det er også en tendens til at denne syklens også blir mindre for prøvene som er lagret over lengre tid. For de frie prøvene ble det i [5] diskutert at det å kun benytte seg av SDI-bidraget til den andre syklens kunne gi bedre resultater, da det virket som at skadde prøver fra virkelige konstruksjoner ble spesielt påvirket i den første syklens, ved lukking av grovere riss. Denne sammenhengen ga imidlertid ikke så ulikt resultat som det å inkludere alle syklens. For de belastede prøvene kan det imidlertid ha en større påvirkning. Dette gir også mening da prøvene fra denne retningen har mindre store riss på tvers av prøven. Det er sannsynligvis lukking av disse rissene som fører til en stor hysteres og stort bidrag på SDI for den første syklens på prøvene fra frie retninger. I figur 5-10 er sammenhengen mellom bidraget fra den andre syklens, SDI_2 (gitt i ligning 3-2), plottet mot ekspansjonen. Figuren viser at forholdet ser ut til å være ganske likt som for vanlig SDI. Korrelasjonskoeffisienten, R^2 , er imidlertid noe høyere noe som tyder lavere spredning i resultatene. Dette ser ut til å spesielt gjelde de belastede prøvestykkene, selv om de også for denne sammenhengen er noe lavere enn prøver fra fri retninger ved tilsvarende ekspansjonsnivå.



Figur 5-10: Bidrag til SDI fra andre sykel (SDI_2) fra kuber, prismer og støpte sylindere fra 2019 og 2020 plottet mot ekspansjon

Ved beregning av SDI ut fra ligning 3-1, som resultatene i avsnittet over viser, summes de forbrukte energiene av alle syklene og før en deler på den tilførte energien av de samme syklene, noe som gjør denne verdien til et slags gjennomsnitt av intensiteten til forbrukt energi. Selv om det ikke er noe forbrukt energi i de siste syklene vil nevneren øke og indeksen gå mot null hvis antallet sykler øker. Dette er ikke helt logisk hvis intensjonen er å beskrive skadegraden av materialet. En alternativ SDI, som ble foreslått i masteroppgaven til Oddbjørn Oseland [26], gitt i ligning 3-3, beregnes ved at raten mellom forbrukt og tilført energi av hver sykel summeres. Dette uttrykket vil gå mot en verdi som øker med antallet sykler, men der bidraget vil bli mindre og mindre da den forbrukte energien går mot null. I figur 5-11 er denne sammenhengen vist for alle prøvestykkene tilsvarende Figur 5-2. Som figuren viser vil formen på sammenhengen være ganske like, som i figur 5-2 bare at den alternative SDI-verdien gir en høyere skalering. Korrelasjonskoeffisienten er også her lav for en polynomisk regresjonslinje der alle prøvestykkene er regnet med ($R^2 = 0,655$).

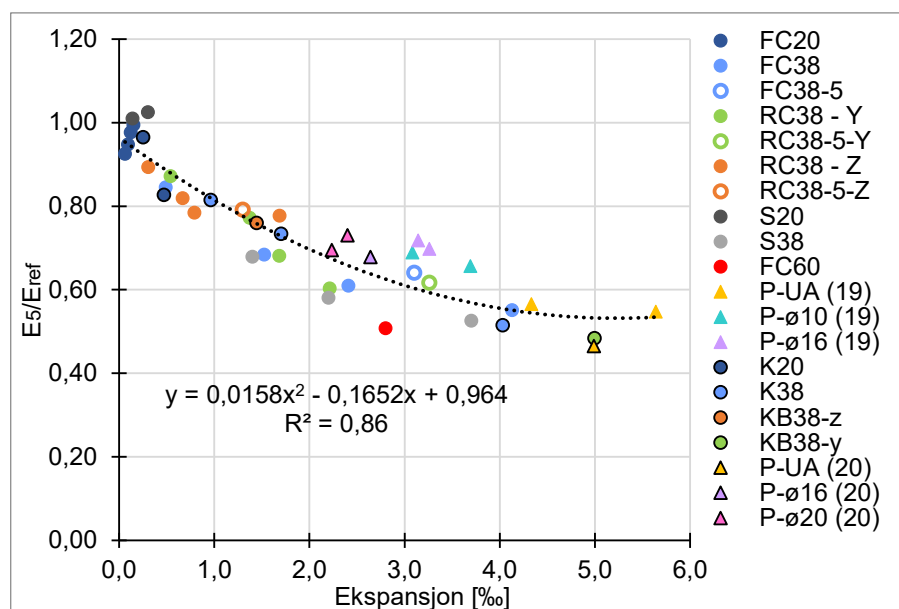


Figur 5-11: SDI_{alt} -verdier fra kuber, prismer og støpte sylindere fra 2019 og 2020 plottet mot ekspansjon

5.1.2 E-modul

I figur 5-12 er E-modul-reduksjonen (E_5/E_{ref}) til de samme prøvestykkene, gitt i tabell F-5 og F-6 i vedlegg F, plottet mot ekspansjonen. Figuren viser at tendensen på kurvene er delvis lik som for SDI, men at sammenhengen når alle prøvestykkene er inkludert er mye bedre. Korrelasjonskoeffisienten (R^2) er her så stor som 0,85. En tendens er at prøvene som avviker mest for SDI avviker noe mindre for reduksjonen av E-modul. Dette gjelder for prøvestykkene fra den femte terminen (FC38-5 og RC38-5), prismene som ble lagret over lang tid og de belastede prøvene ved en ekspansjon >1 %. Variasjonen ser også ut til å være mindre ved høye ekspansjonsnivåer. Prøven lagret ved 60 °C ser ut til å være den som avviker mest og viser her en høyere skadegrad sammenlignet med de frie prøvene lagret ved 38 °C i motsetning til SDI-verdien som viste en lavere skadegrad.

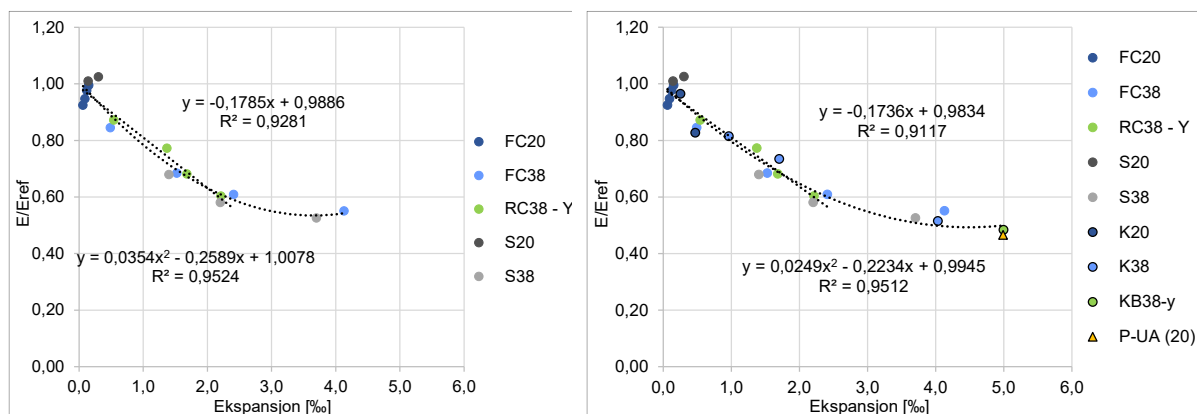
Som tidligere diskutert var det spesielt hysteresen ved første sykel som var redusert for de belastede prøvene og prøvene lagret over lang tid. Årsaken kan være mindre store riss normalt på lastretningen sammenlignet med prøver fra frie retninger ved tilsvarende ekspansjonsnivå. Da det er sekant E-modulen ved den siste syklens som benyttes er ikke denne sammenhengen nødvendigvis like påvirket av dette, som også kan sees i figur 5-10 da kun SDI bidraget fra den andre syklens ble plottet mot ekspansjonen. Som tidligere diskutert, kan en form for fastholding spesielt ha gunstig effekt på opprissing i pastaen og reaksjonsproduktene kan også være noe annerledes der. Da E-modulen generelt er mer påvirket av stivheten til tilslagene enn pastaen kan den derfor være noe mindre sensitiv for belastning og effekten av reaksjonsproduktene på prøver lagret over lengre tid sammenlignet med SDI-verdiene. E-modul kan derfor være et noe mer pålitelig skadeparameter da prøvenes historie og/eller belastningsforhold ser ut til å bety mindre enn for SDI-verdiene.



Figur 5-12: E_5/E_{ref} -verdier fra kuber, prismer og sylindere fra 2019 og 2020 plottet mot ekspansjonen

I figur 5-13a) og b) er sammenhengen mellom reduksjon av E-modul og ekspansjonen for prøvene fra frie retninger vist, tilsvarende som i figur 5-3 for SDI. Figur 5-13a) viser prøvene fra 2019 som tidligere ble benyttet i Stemland et al. [5] og figur 5-13b) viser sammenhengen

også med prøvestykker fra frie retninger fra 2020. Korrelasjonskoeffisienten er høy i begge tilfeller noe som bekrefter at prøvene fra 2020 oppfører seg på tilsvarende måte som de fra 2019. Korrelasjonskoeffisienten er også bedre enn for SDI, selv om denne sammenhengen også er god for prøvestykkene fra frie retninger. Fordelen med SDI i forhold til E-modul er at man ikke er avhengig av en referanse E-modul. Dette gjelder spesielt for prøver fra eksisterende konstruksjoner der den kan være vanskelig å bestemme.

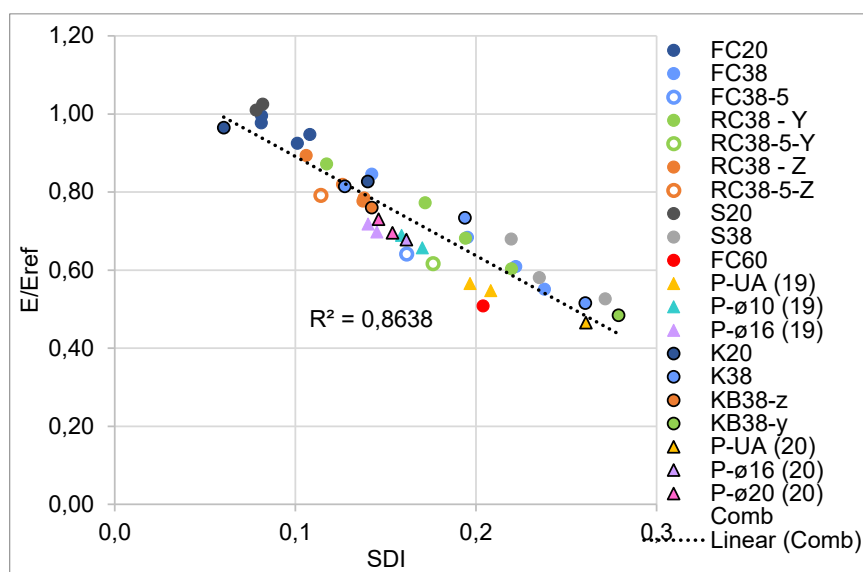


a) Prøver fra 2019 gitt i [5]

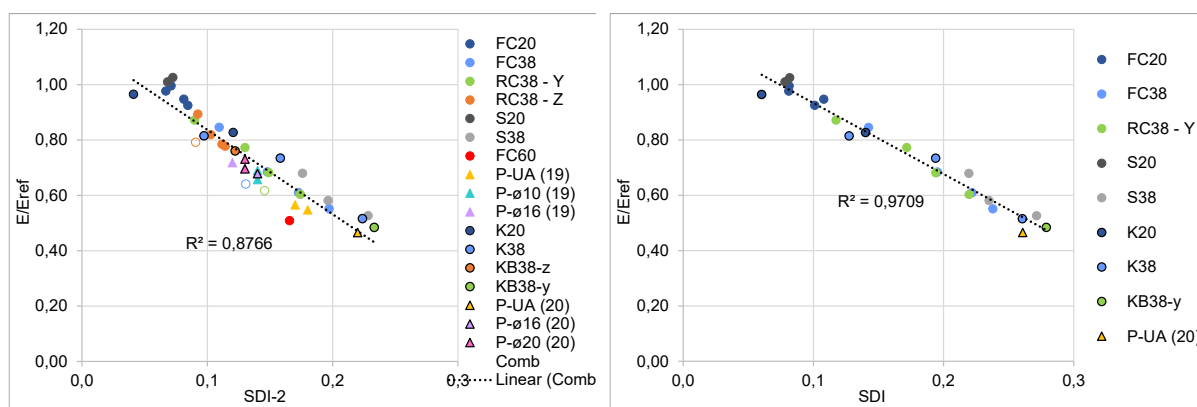
b) Samme resultater som i a) med prøver fra frie retninger på kuber og prismer fra 2020.

Figur 5-13: E_5/E_{ref} verdier fra frie retninger på kuber og sylindere plottet mot ekspansjon med tilhørende lineære og polynomiske regresjonslinjer

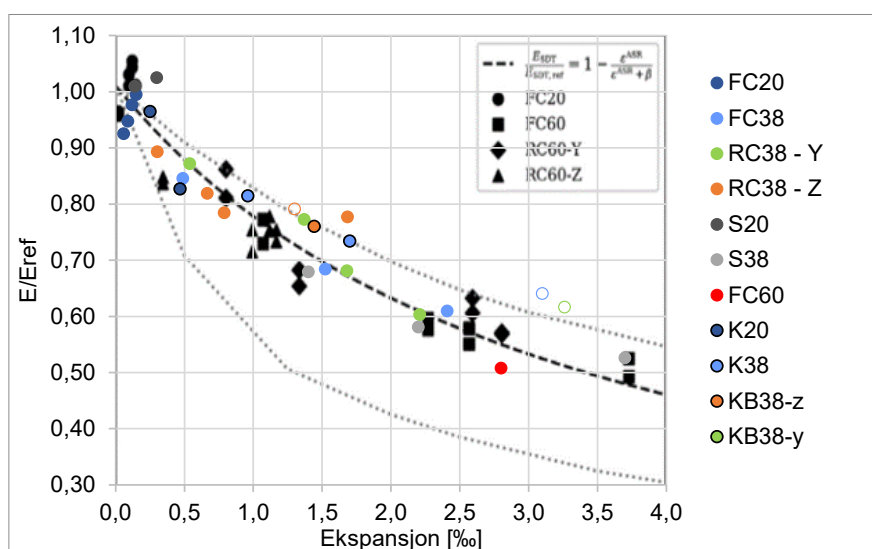
I figur 5-14a) og b) er henholdsvis SDI, og SDI_2 plottet mot E_5/E_{ref} . I figur 5-14c) er SDI plottet mot E_5/E_{ref} kun for prøvene fra frie retninger, vist i figur 5-2b) og 5-13b). Alle figurene viser at det er en god sammenheng mellom E-modul og SDI. De bekrefter også at det er prøvene lagret over lengre tid, prøven lagret ved 60 °C og de belastede prøvene som skiller seg mest ut. Figur 5-14c) viser at om kun de prøvene fra frie retningene er tatt med har de en R^2 helt oppe i 0,97. Plottet mot E_5/E_{ref} har SDI_2 en noe bedre sammenheng enn SDI, men de er likevel forholdsvis like.



a) E_5/E_{ref} mot SDI for alle prøvestykker fra 2019 og 2020

b) E_5/E_{ref} mot SDI_2 for alle prøvestykkerc) E_5/E_{ref} mot SDI for prøvestykker fra friFigur 5-14: Reduksjon av E-modul (E_5/E_{ref}) plottet mot SDI og SDI_2

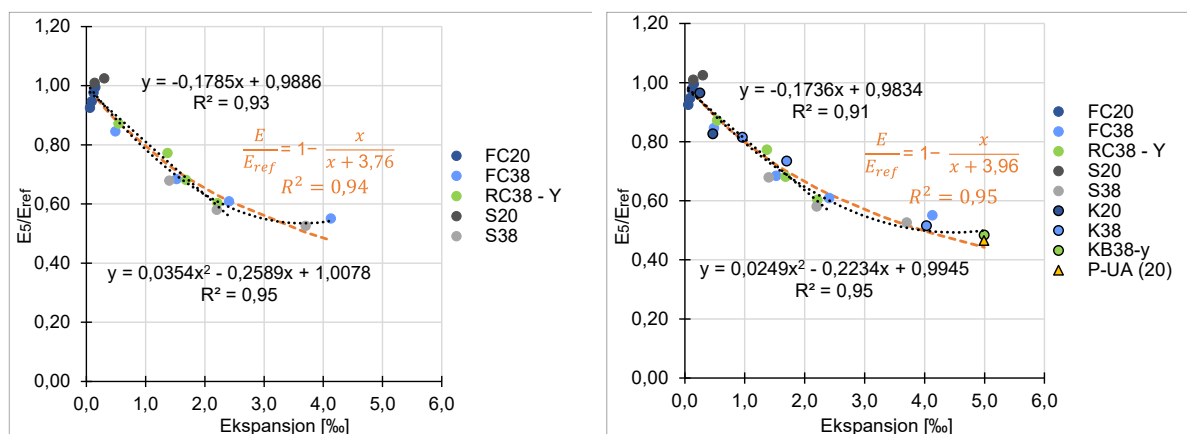
I figur 5-15 er sammenhengen mellom E_5/E_{ref} og ekspansjon fra kuber og sylindre plottet sammen med samme sammenhengen fra Kongshaug et al [14]. Her er imidlertid gjennomsnittet av avlastingskurvene mellom andre, tredje og fjerde sykel og ikke gjennomsnittet mellom femte på- og avlasting som i denne undersøkelsen. Sanchez et al. [6, 32] benyttet seg av gjennomsnittet av andre og tredje sykel basert på test-prosedyren for vanlig E-moduls prøving. Denne er imidlertid ikke nødvendigvis egnet for skadet betong. Resultatene er dermed ikke helt sammenlignbare, men er likevel vist. Kongshaug et al. [14] benyttet et gjennomsnitt av referanseprøvene (lagret ved 20 °C) som E_{ref} . Øvre og nedre grense for undersøkelsene til Sanchez et al [32] er som i figur 5-4 stiplet med grå linjer.

Figur 5-15: E_5/E_{ref} plottet mot ekspansjon fra kuber og sylindere sammen med resultater fra Kongshaug et al. [14] ($R^2 = 0,94$) og øvre og nedre grensekurver fra Sanchez et al. [32]

Figuren viser at sammenhengen mellom de to laboratorieprogrammene ser ut til å være bedre for reduksjon av E-modul enn for SDI , der resultatene til denne undersøkelsen lå litt høyere (større skade). Prøven lagret ved 60 °C fra denne undersøkelsen viser imidlertid en noe større skade (mindre E_5/E_{ref}). Data-punktene fra belastet retning fra [14] (svarte trekant datapunkt) ligger også litt under regresjonskurven og data punkt fra frie retninger ved ca. samme ekspansjonsnivå. Dette er i kontrast til SDI -verdiene som viste en mindre skadegrad. Forskjellene er imidlertid så små at det kan være tilfeldig.

I figur 5-16a) og b) er regresjonsfunksjonen fra Wen [34] benyttet av Kongshaug et al. [14], vist i figur 5-15 og ligning 5-2, benyttet for sammenhengen fra de frie prøvestykkene vist i figur 5-13a) og b). På samme måte som for sammenhengen med SDI vil de polynomiske funksjonene flate mer ut ved høyere ekspansjoner, mens denne funksjonen vil gi en videre reduksjon. Korrelasjonskoeffisienten (R^2) for denne funksjonen er for begge sammenhengene ganske lik som for den polynomiske (ca. 0,95).

$$\frac{E}{E_{ref}} = 1 - \frac{\varepsilon_{ASR}}{\varepsilon_{ASR} + \beta} \quad (5-2)$$

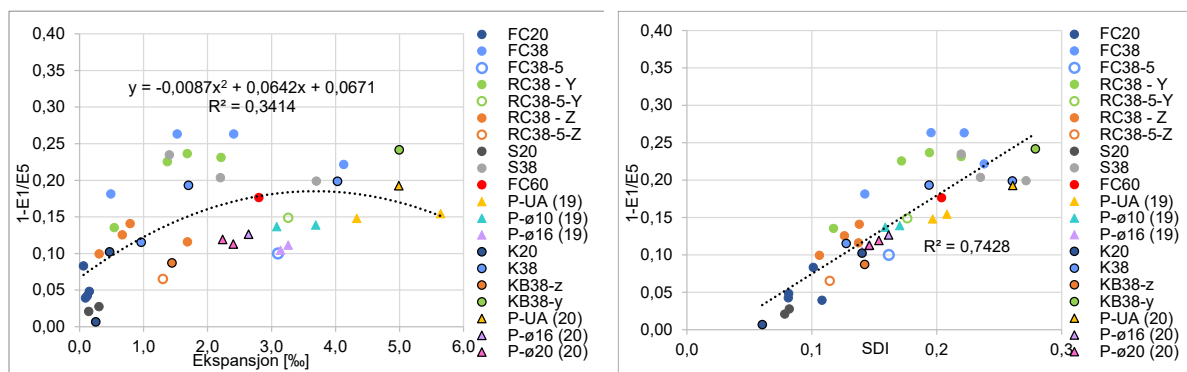


a) Prøver fra 5-13a)

b) Prøver fra 5-13b)

Figur 5-16: E_5/E_{ref} -verdier til prøver fra frie retninger plottet mot ekspansjonen (tilsvarende figur 5-13a) og b) og vist med regresjonsfunksjon fra [34] vist i ligning 5-2 markert i oransje

Da reduksjon av E-modul er en parameter som er avhengig av en referanseverdi ble det undersøkt om forskjellen mellom første og siste sekant E-modul kan være en god skadeparameter. Testing av prøver fra eksisterende konstruksjoner utført av SINTEF har vist en god sammenheng mellom forskjellen på første og andre sekant E-modul og SDI. Her er forholdet mellom første pålastings sekant E-modul og gjennomsnittet av siste på- og avlastings sekant E-modul, uttrykt som $(1-E_{opp,1}/E_5)$, plottet som funksjon av ekspansjonen og de tilhørende SDI verdiene i figur 5-17a) og b). Siden $E_{opp,1}/E_5 < 1$, vil $(1-E_{opp,1}/E_5)$ bli stigende med økende ekspansjon og SDI verdier.

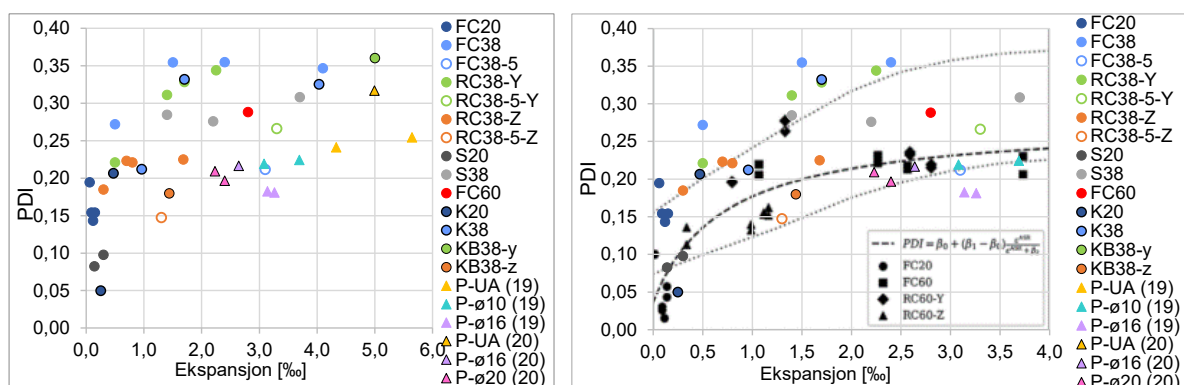
a) $1-E_1/E_5$ plottet mot ekspansjonb) $1-E_1/E_5$ plottet mot SDI

Figur 5-17: $1-E_1/E_5$ plottet mot ekspansjon og SDI for kuber, prizmer og sylindere

Som figur 5-17a) viser er sammenhengen med ekspansjon dårligere enn for både E_5/E_{ref} og SDI. Spredningen er også mye større. Resultatene spriker spesielt mye mellom prøvene fra fri og fastholdt retning ved samme ekspansjonsnivå og verdiene ser ut til å være henholdsvis høyere og lavere enn middelverdien sammenlignet med SDI (vist i figur 5-2). Figur 5-17b) viser at forholdet mellom SDI og $E_{opp,1}/E_5$ spriker mer ved litt høyere verdier, som også tyder på at $E_{opp,1}/E_5$ er mer følsom for opprissing.

5.1.3 PDI

«Plastic Deformation Index» (PDI) er et skadeparameter som ble diskutert i både Sanchez et al [6] og Kongshaug et al. [14]. I figur 5-18a) er de gjennomsnittlige PDI-verdiene for prøvestykkene, vist i tabell F-5 og F-6 i vedlegg F, plottet mot ekspansjonen. Merkingen av figuren er lik som i figurene som viste sammenhengene med SDI og E_5/E_{ref} . Spredningen er, som figuren viser, høy. Det ser ut til å være en viss tendens til at prøvene fra frie retninger også her er høyere enn de med en form for belastning (RC38-Z, P-Ø10, P-Ø16, P-Ø20), men spredningen er mye høyere også for disse prøvene seg imellom sammenlignet med E_5/E_{ref} og SDI. I figur 5-18b) er PDI-verdiene fra denne undersøkelsen sammenlignet med prøvene fra [14] og de øvre og nedre grenseverdiene til kurvene fra [32]. Som figuren viser, ligger resultatene fra denne undersøkelsen både over og under disse grensene. Data punktene fra fri retninger ligger stort sett over verdiene fra [14].



a) PDI mot ekspansjon fra denne undersøkelsen b) PDI mot ekspansjon sammenlignet med Kongshaug et al. [14] ($R^2=0,76$) og øvre og nedre grensekurver fra Sanchez et al. [32]

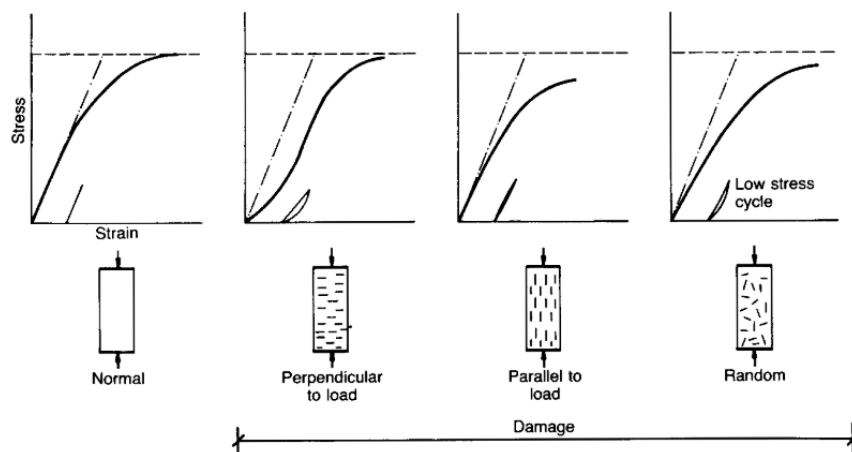
Figur 5-18: PDI plottet mot ekspansjonen for alle prøver fra 2019 og 2020

5.1.4 NLI

«Non-Linearity Index» (NLI) er også diskutert i tidligere undersøkelser [14, 22, 32]. Dette er forholdet mellom sekant E-modulen ved 50 % av lasten ($E_{opp,1,50\%}$) og ved maks last ($E_{opp,1}$) for første sykel. Kurvenes form vil påvirke denne parameteren; en konveks form (bue innover eller motsatt vei) og gir en $NLI < 1$ mens en konkav form (buer utover i forhold til sekant linjen ved maks last) gir $NLI > 1$.

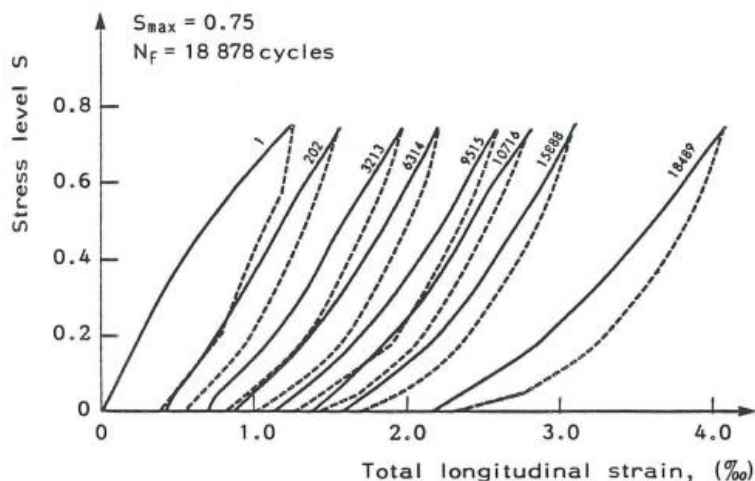
Denne parameteren skal ifølge Chrisp et al. [22] si noe om prøvens rissorientering. Det er imidlertid noe uklart hvordan rissene vil påvirke denne parameteren da det i teksten står at en prøve med rissorientering normalt på lasten vil gi $NLI > 1$ og en prøve med riss i lastretningen

vil gi en $NLI < 1$. I den tilhørende figuren, gjengitt i figur 5-19, er det imidlertid vist at for en prøve med riss normalt på lastretningen vil kurven være konveks/buer innover som vil gi en $NLI < 1$ ($E_{opp,50\%} < E_{opp}$). For prøven med last normalt på rissene er det imidlertid vist en konkav kurve som buer utover og som vil gi en $NLI > 1$ ($E_{opp,50\%} > E_{opp}$). Forholdet gitt i figuren er mest logisk, da det er mest rimelig å anta at en prøve med riss normalt på lasten først vil tøy seg ved lave spenninger for å lukke rissene, før prøven får en stivere oppførsel etter at rissene er lukket. En prøve med riss i lastretningen vil imidlertid oppføre seg tilnærmet som en uskadet betong ved lave spenninger før den tøyer seg mer etter hvert som spenningene øker.



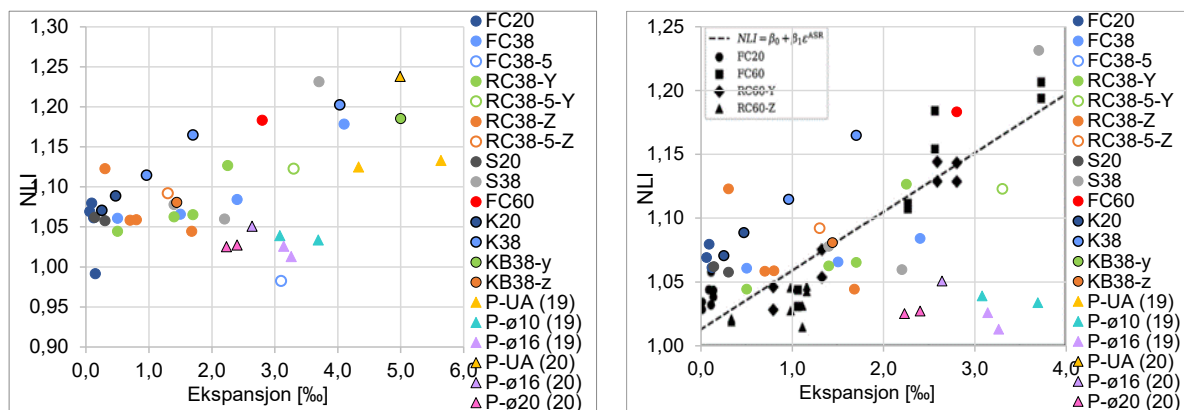
Figur 5-19: Beskrivelse av rissorientering og påvirkningen dette har på spennings/tøyningskurvene fra SDT fra Chrisp et al. [22]

En konveks form (bue innover eller motsatt veg) er ikke observert på noen spennings/tøyningskurver fra denne undersøkelsen, og alle NLI -verdiene er større enn 1. Det samme gjelder også undersøkelsene fra [14, 32]. I motsetning til denne og disse undersøkelsene benytter Chrisp et al. [22] gjennomsnittet av de siste fire syklene og ikke den første. Dette kan være en forklaring på disse resultatene da forsøk av syklisk lasting på uskadet betong har vist at slike kurver kan gå fra å være konkave til å bli konvekse etter flere sykler, som vist i figur 5-20 [35]. Dette gjelder imidlertid spesielt for prøver med riss orientert i lastretningen. Årsaken til dette kan være at en slik prøve har uskadete «lameller» mellom rissene som er stivere enn andre. Her kan det oppstå et viss kryp i betongpastaen, som vil føre til utvikling av riss normalt på lasten. Åpning og lukking av disse rissene fører til en konveks kurve ved både på- og avlastning. En trend som kan ses fra spennings-tøynings kurvene i Figur 5-1, var at de går mot en mer konveks form etter flere sykler. Det er imidlertid ikke funnet noen forskjell på prøvene fra armeringsretningen eller tvers på denne.



Figur 5-20: Variasjon av spennings-tøyningskurver ved økende antall sykler [35]

De gjennomsnittlige NLI-verdiene til prøvestykkene vist i tabell F-5 og F-6 i Vedlegg F er plottet mot ekspansjon i figur 5-21a). Beskrivelsen av de ulike prøvene er lik som i tidligere figurer i dette avsnittet. I figur 5-21b) er resultatene i 5-21a) vist sammen med resultatene fra Kongshaug et al [14]. Som tidligere nevnt, er alltid $NLI > 1$ for alle prøver både fra denne undersøkelsen og undersøkelsen fra [14], med unntak fra FC38-5 og en kube lagret ved 20 °C (FC20-4). Det er imidlertid en viss tendens til at prøvestykkene fra belastet og armert retning får en lavere verdi enn prøvestykkene fra fri retninger. Det er likevel stor spredning i resultatene.



a) NLI mot ekspansjon fra denne undersøkelsen

b) NLI mot ekspansjon sammenlignet med Kongshaug [14] ($R^2 = 0,83$)

Figur 5-21: NLI fra kuber, prismer og sylindere plottet mot ekspansjon

Hvordan hver enkelt prøve er testet kan også påvirke denne verdien. Selv om det er gjort likt hver gang, kan det være noen individuelle forskjeller som gir utslag. Blant annet er den første delen av testen på noen av prøvene manuelt forskjøvet da testen er automatisk innstilt og starter loggingen fra en forlast på 10 kN. Tøyningen/forskyvningen denne forlasten er beregnet fra sekant E-modulen til den første pålastingskurven ($E_{opp,1}$) og plottes deretter lineær fra null opp til 10 kN. Feilen dette gir er antatt å være liten i forhold til SDI og E-modul, men det er mulig at dette vil påvirke NLI-verdiene. Siden forskyvningen er basert på sekant E-modulen ved

første pålastingskurve kan tøyningen opp til 10 kN bli overestimert noe som fører til en lavere sekant E-modul opp til 50 % last og igjen en lavere NLI. Kongshaug et al. [14] har mindre spredning i sine resultater. Disse testene ble utført manuelt fra null og trenger derfor ikke å forskyves i etterkant. Dette gjelder også resultatene fra de første testene i undersøkelsen fra 2019 (fra termin 1, 2 og 3). Disse prøvene hadde alle en ekspansjon < 3 ‰. Ser man kun på disse resultatene er spredningen mindre, men de viser imidlertid ikke noe særlig økning i NLI med ekspansjonen.

5.1.5 Påvirkning av lastnivå på SDT

Påvirkningen av lastnivå på resultatene fra SDT er tidligere diskutert mye i litteraturen, som beskrevet i avsnitt 3.3.1. I Sanchez et al. [25] er det konkludert med at det å benytte 40 % av 28-døgnsfastheten til betongen gir de beste resultatene. Det diskuteres også at det å benytte 40 % av den reelle fastheten til prøvene kan være en god fremgangsmåte. Dette nivået kan imidlertid være vanskelig å bestemme nøyaktig da fastheten blir bestemt etter testingen er ferdig. Spesielt gjelder for prøver fra eksisterende konstruksjoner. Hvis en betong er veldig skadet, og dermed også har en redusert trykkfasthet kan lastnivået overstige 40 % av den faktiske trykkfastheten. Sanchez et al. [25] argumenterte for at en fordel med SDI-verdien var at den var mindre følsom for lastnivået enn såkalte «absolute value parameters» som hysteresese areal, plastisk deformasjon og E-modul som alle avhenger av mengde tilført energi. Lastnivået ble delvis diskutert i [5] da det var stor variasjon i fastheten til prøvene fra Elgeseter bru. Resultatene viste imidlertid ikke en tydelig sammenheng mellom lastnivå og SDI. Prøvene som hadde et høyt lastnivå, hadde også en korresponderende høy skade og fikk dermed en høy SDI litt uavhengig av lastnivå. I denne undersøkelsen er lastnivået stort sett ganske likt og det er ikke funnet noen sammenheng mellom lastnivå og forskjell på skadeparametere.

Det ble besluttet å undersøke dette forholdet med en stikkprøve. To sylindere fra y-retningen til kube K38-3 (uten belastning) ble derfor testet for SDT med et høyt og et lavt lastnivå, henholdsvis 67,6 % og 22,9 % av fastheten.

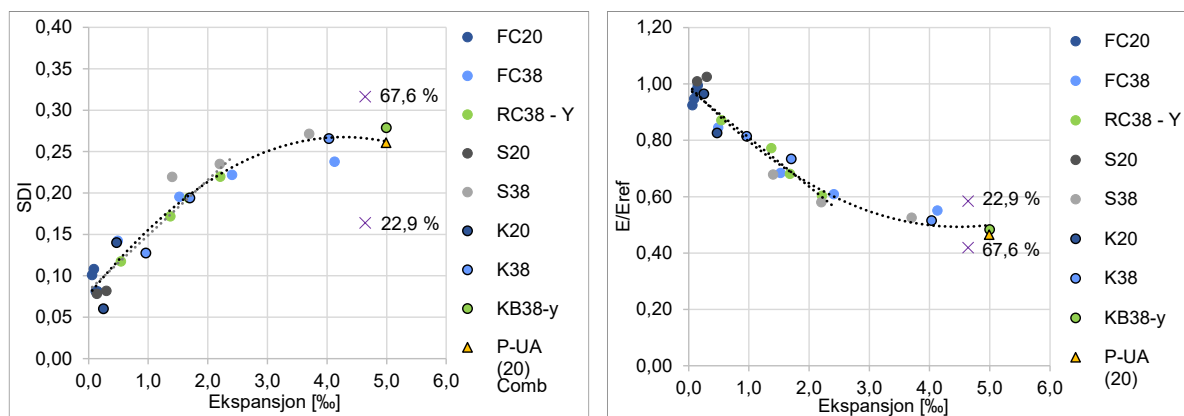
Resultatene er vist i tabell 5-1. Begge prøvene ble testet for arbeidsdiagram etter endt SDT og fikk en ganske lik fasthet. SDI-verdiene er imidlertid veldig ulike, henholdsvis 0,32 og 0,16. Til sammenligning hadde prøvene fra samme kube i z-retning, som også hadde en forholdsvis lik fasthet og dermed et lastnivå på ca. 50 %, SDI-verdier på 0,25 og 0,27. Disse resultatene er vist i tabell F-2, men er også vist i tabell 5-1 for sammenligning. Ekspansjonen til disse prøvene var noe lavere enn prøvene i y-retning (4,03 vs. 4,64 ‰).

Tabell 5-1: Resultater fra SDT på kjerner fra kube K38-3 testet ved ulikt lastnivå [%]

Prøve	ϵ_{AR} [%]	$E_{opp,1}$ [MPa]	$E_{ned,1}$ [MPa]	$E_{opp,5}$ [MPa]	$E_{ned,5}$ [MPa]	E_5/E_{re} f	SD I	SDI _{al} t	Lastnivå å [%]	f_c [MPa]
K38-3- y ₁	4,6 4	10820	14688	13361	13505	0,42	0,3 2	1,48 0	67,6	29,5
K38-3- y ₂	4,6 4	16090	19920	18732	18702	0,58	0,1 6	0,77 1	22,9	30,6

K38-3- z ₁	4,0 3	13643	18293	16823	17138	0,53	0,2 5	1,18 8	50,3	33,5
K38-3- z ₂	4,0 3	12782	17394	15913	16095	0,50	0,2 7	1,26 3	52,0	32,4

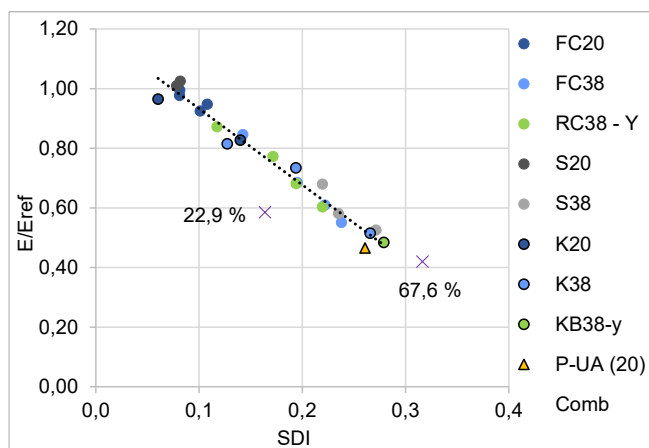
Figur 5-22a) og b) viser SDI og E_5/E_{ref} for de to prøvene plottet sammen med resultatene fra de frie retningene vist i figur 5-3b) og 5-13b). Prøvene med avvikende lastnivå er her markert med lilla kryss. Resultatene viser at en økning i last på 17 % (lastnivå 67,6 %) gir en økning i SDI på ca. 20 % og en reduksjon av E-modul på 19 % sammenlignet med gjennomsnittet av prøvene i z-retning. En reduksjon i lastnivå på 27 % (lastnivå 22,9 %) gir imidlertid 40 % reduksjon av SDI og 11 % økning av E_5/E_{ref} . Det ser derfor ut til at SDI, i motsetning til det litteraturen argumenterte for, er mer påvirket av lastnivået enn E_5/E_{ref} . Dette gjelder spesielt det lave lastnivået, der en SDI på 0,16 vil kunne gi en estimert ekspansjon på rundt 1 ‰ i stedet for 4,6 ‰ som er den ekspansjonen prøven har. Det høye lastnivået ser ut til å bety noe mindre, men økningen var også mindre i prosent. Figur 5-23, der de samme punktene er plottet for sammenhengen mellom E_5/E_{ref} og SDI for de frie prøvene fra figur 5-14c), viser også dette. Punktet med høyt lastnivå ligger her i en videreføring av linjen, mens punktet med lavt lastnivå ligger godt utenfor.



a) SDI for prøver med høyt og lavt lastnivå vist med resultater figur 5-3b)

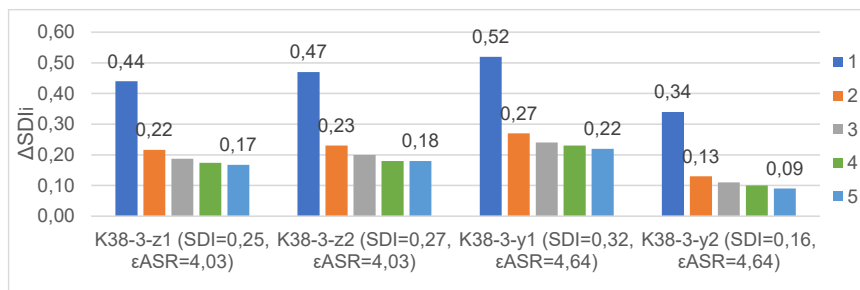
b) E_5/E_{ref} for prøver med høyt og lavt lastnivå vist med resultater fra figur 5-13b)

Figur 5-22: Resultater for SDI og E_5/E_{ref} fra med høyt og lavt lastnivå (K38-3-y₁ og K38-3-y₂) markert med kryss sammen med resultater fra figur 5-3b) og 5-13b)



Figur 5-23: E_5/E_{ref} plottet mot SDI for prøver med høyt og lavt lastnivå (K38-3-y₁ og K38-3-y₂) markert med kryss vist med figur 5-14c)

I figur 5-24 er delbidragene til SDI fra hver sykel for de ulike prøvene i tabell 5-1 vist. Det virker ut fra dette ikke som om det er noen trend at lastnivået påvirker noen sykler mer enn andre og at bidragene er ganske like som for prøver fra fri retninger ved tilsvarende SDI-verdier. Denne undersøkelsen er kun en stikkprøve på to prøver med en høy ekspansjon, det er dermed ikke sikkert denne sammenhengen er gjeldene på andre prøver. Undersøkelsen viser imidlertid at lastnivået har en del og si for resultatene. Dette bør derfor undersøkes nærmere.



Figur 5-24: Forhold mellom forbrukt og påført energi i hver sykel (1-5) for prøver fra kube K38-3 med ulikt lastnivå

5.2 Resultater fra prøving av arbeidsdiagram og trykkfasthet

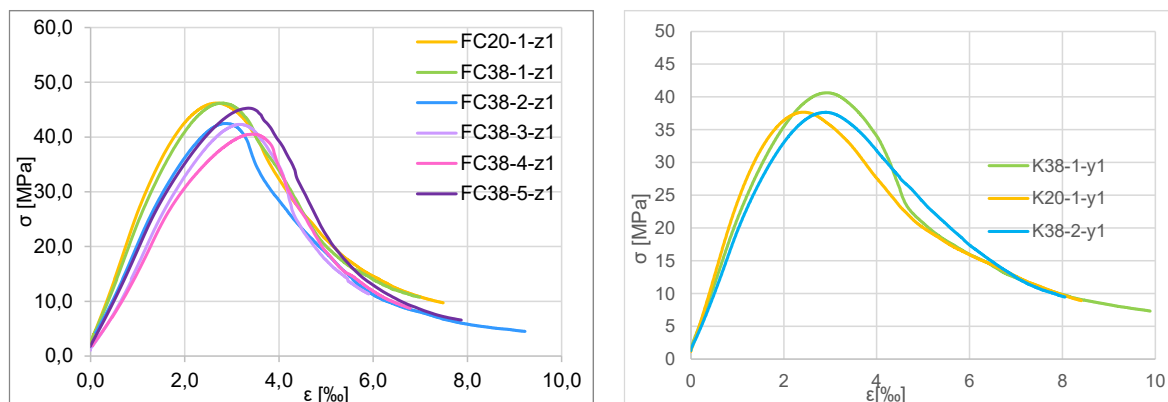
Tabell G-1 i Vedlegg G viser alle resultater fra testing av arbeidsdiagram på de samme prøvestykkene som er testet for SDT. I tillegg til trykkfasthet er tøyning ved maks last, ϵ_{peak} og sekant E-modulen ved 40 % av maks last for prøvene, E_{arb} , også funnet fra arbeidsdiagrammene. Noen av prøvene fikk problemer med tøyningmålingene, men fastheten er fremdeles funnet fra arbeidsdiagrammet. Dette gjelder S38-1, S38-2, S38-4, RC38-5-y₁ og RC38-5-y₂. Prøve S38-3 hadde feil ved målingen, mens RC38-4-y₁ ble testet laststyrt for vanlig trykkfasthet. Tabell G-2 viser resultatene til prøvene som er testet laststyrt til brudd.

Tøyningshastigheten til disse prøvene var 0,3 % pr. minutt, noe som betyr at de i et område med en E-modul på 20 000 MPa har en pålastingshastighet på ca. 0,10 MPa pr. sekund, som er ca. 1/10-del av hastigheten ved vanlig laststyrt prøving. Etter hvert som spenning-tøyningskurven bøyer mer av og blir mer "plastisk", vil denne lasthastigheten bli enda lavere før den blir null på toppen og så negativ for den fallende delen av kurven. Dette betyr at det både må forventes et større kortidskryp og en lavere fasthet ved denne typen prøving enn ved vanlig laststyrt prøving. Det er også mulig at prøvene får en litt lavere fasthet fordi de først testes for SDT. Påvirkning av SDT og hastighet ved testing av fasthet er diskutert litt nærmere i avsnitt 5.2.1.

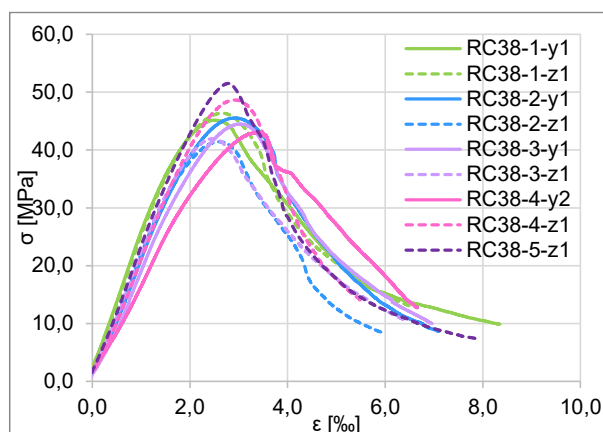
I figur 5-25 er arbeidsdiagrammene til noen utvalgte kjerner vist. Figur 5-25a) viser prøver fra frie kuber fra 2019 med økende ekspansjon; henholdsvis 0,06-, 0,5-, 1,5-, 2,4-, 4,1- og 3,1 % for kjerner fra kubene FC20-1, FC38-1 til FC38-4, samt én kerne fra kube FC60 med 2,8 % ekspansjon. Ekspansjonen er her lik den målte ekspansjonen i samme retning som kjernene er boret fra. Figuren viser at kurvene får et lavere toppunkt (lavere fasthet) og en større tøyning/forskyvning før toppunktet nåes med økt ekspansjon. Prøven fra den femte kuben, som etter uttak fra 38 °C ble lagret ved 20 °C i 197 dager, har imidlertid en mye høyere fasthet, noe som kan tyde på at det har vært en viss fasthetsutvikling for disse prøvene i den ekstra lagringstiden. Tøyningen ved brudd er ca. lik som for kubene fra fjerde termin. Tilsvarende kurver for kjerner fra frie kuber fra 2020, med ekspansjonsnivå 0,24-, 0,96- og 1,7 % er vist i figur 5-25 b). Disse kjernene er fra kube K20-1, K38-1 og K38-2. Figuren viser at fastheten er lavest for prøve K20-1-y₁ så å øke for K38-1-y₁ for deretter å bli redusert til ca. samme nivå K20-1-y₁ igjen for prøve K38-3-y₂ med høyes ekspansjon. Tøyningen ser ut til å være ca. lik for prøve K38-1-y₁ og K38-2-y₁ og er noe større enn prøve K20-1-y₁, fra referansekuben lagret ved 20 °C.

Kurver fra testede kjerner fra de belastede kubene RC38-1 til RC38-5 fra 2019 er vist i figur 5-25c). Kurvene fra kjernene fra z-retningen (belastet retning) er vist med stiplet linje og y-retningen (fri retning) med heltrukken linje. Ellers er fargene lik som for prøvene fra de frie kubene vist i figur 5-25a) ved de samme terminene. Ekspansjonene er 0,54-, 1,37-, 1,68- og 2,21 % i y-retningen og 0,2-, 0,66-, 0,8-, 1,7- og 1,3 % i z-retningen. Figuren viser at for prøvene fra y-retningen øker tøyningen før toppunktet med økt ekspansjon, mens fastheten først går noe opp før prøven fra 1. termin og så ned for prøven fra 2. termin. I belastet retning ser imidlertid fastheten ut til å gå ned for kjernene fra 2. og 3. termin, før den øker igjen for 4. og 5. termin. Tøyningene ved maks last er imidlertid ganske like for alle ekspansjonsnivå.

Kjernen fra 4. termin, RC38-4-z₂ har den største tøyningen, mens kjernen fra femte termin (som også ble lagret ved 20 °C i 197 døgn etter uttak fra 38 °C) har, som for kjernene fra de frie kubene, den høyeste fastheten.



a) Kjerner fra FC20 og FC38-1,2,3,4,5 fra 2019 b) Kjerner fra K20-1, K38-1 og K38-2 fra 2020



c) Kjerner fra belastede prøver RC38-1 til RC38-4 i z- (stiplet) og y-retning

Figur 5-25: Arbeidsdiagram for kjerner boret fra kubene fra 2019 og 2020

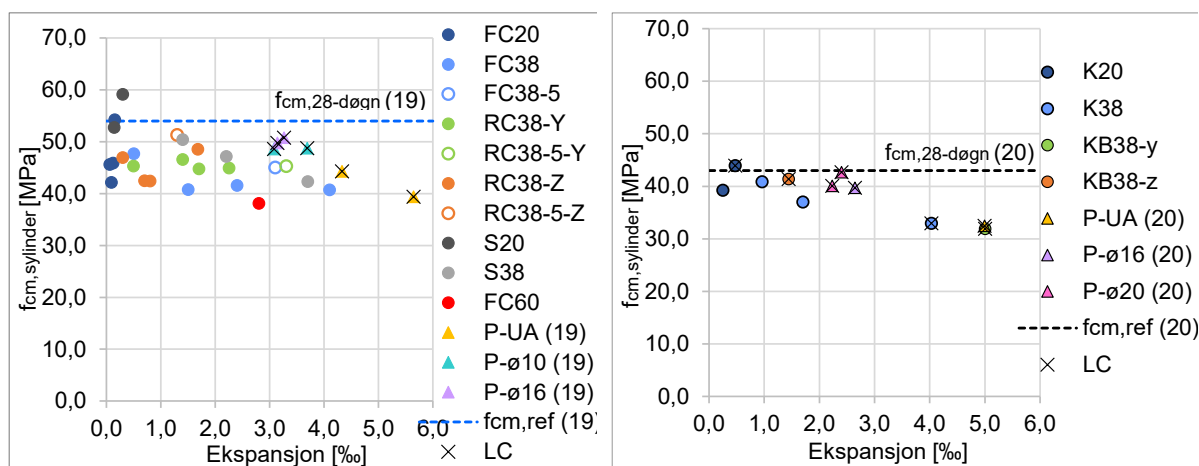
De gjennomsnittlige skadeparameterne fra arbeidsdiagram og statisk testing av trykkfasthet er vist i tabell G-3 og G-4 i vedlegg G for prøvene fra henholdsvis 2019 og 2020. Som for de gjennomsnittlige skadeparameterne fra SDT, vist i tabell F-5- og F-6, er hvert punkt fra kjernene fra kubene og de støpte sylindrene et gjennomsnitt av to prøver, mens hvert punkt prismene er resultatet fra en prøve. Tabellen viser forholdet mellom fastheten og en referansefasthet, $f_{cm}/f_{cm,ref}$, toppptøyningen, ϵ_{peak} og forholdet mellom sekant E-modulen ved 40 % av maks last og en referansefasthet for denne verdien, $E_{arb}/E_{arb,ref}$.

Gjennomsnittlig 28-døgns sylindrefasthet er lik 54 MPa ($0,8 \cdot f_{cm,cube}$) og 43 MPa for henholdsvis 2019- og 2020-serien. En referanseverdi for trykkfastheten er vanskeligere å bestemme da prøvene får en fasthetsøkning. Høyere temperaturer vil også gi en hurtigere/økt fasthetsutvikling. Da vi ikke har noen referanse (prøve uten AR) lagret ved 38 °C er det vanskelig å bestemme hvor mye større fastheten blir ved 38 °C. Tabell G-3 og G-4 viser en reduksjon i trykkfasthet, $f_{cm}/f_{cm,ref}$, både for en referansefasthet lik 28-døgnsverdiene til de to seriene og en fasthetsutvikling for prøvene funnet fra terninger lagret ved 20 °C. For 2019-serien er denne fasthetsøkningen vist i figur 5-30, mens den for 2020-serien er vist i Rapport

854 [15], da referanseprøvene her primært var knyttet til bjelketestingen. I 2019-serien ble terningene lagret i bøttene sammen med referansekubene (FC20), mens de for 2020-serien ble lagret i vannbad. Referanseverdien til E-modulen bestemt fra arbeidsdiagram er valgt til 25- og 24000 MPa for prøvene fra henholdsvis 2019- og 2020. Dette er den høyeste verdien funnet fra referanseprøvene lagret ved 20 °C.

5.2.1 Trykkfasthet

I figur 5-26a) og b) er midlere trykkfasthet, f_{cm} , funnet fra arbeidsdiagram (deformasjonsstyrt) og laststyrt prøving for prøvene fra henholdsvis 2019 og 2020 plottet mot prøvenes ekspansjon. Merkingen av prøvene er lik som i tidligere figurer i kapittel 5.1. Fastheten ved 28-døgn, henholdsvis 43 og 54 MPa for 2020- og 2019-serien, er vist med stiplete linjer. Prøvene som er testet laststyrt til brudd og ikke fra arbeidsdiagram er markert med kryss. Figuren antyder at disse har en noe høyere fasthet enn de som er testet deformasjonsstyrt. Figuren viser at relasjonen mellom trykkfasthet og ekspansjon ikke gir en like tydelig sammenheng som for SDI og reduksjon i E-modul. Som tidligere nevnt, er noe av årsakene til dette er at fastheten øker med alderen og dermed kompensere for fasthetsreduksjonen på grunn av AR i tillegg til at en lagringstemperatur på 38 °C også vil gi en økt fasthetsutvikling/modenhet. På grunn av dette ble ingen av prøvene eksponert for akselererte forhold før etter 28-døgnsfastheten var nådd. Fastheten får en viss reduksjon ved økt ekspansjon, men ser ut til å holde seg på et nivå rundt 80 % av 28-døgnsverdiene.

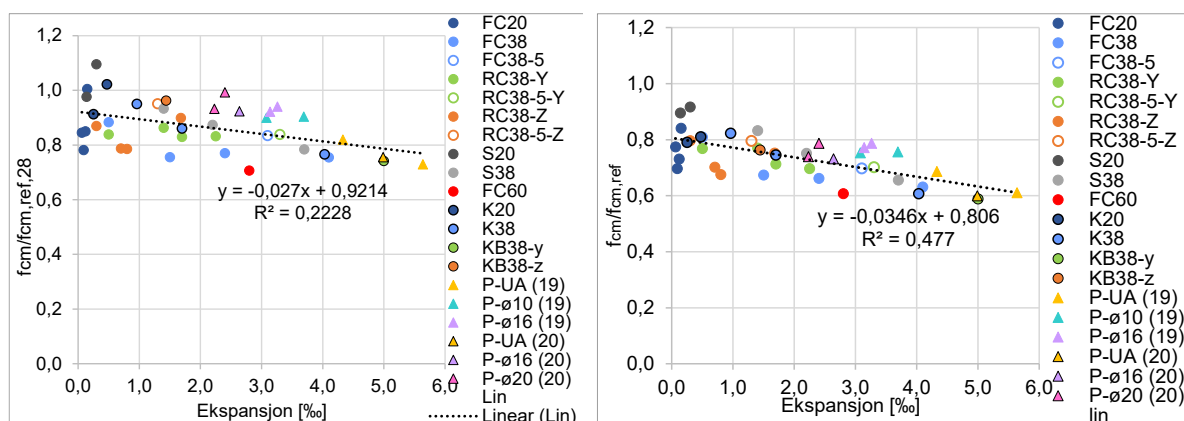


a) Prøver fra 2019, $f_{cm,28} = 54$ MPa

b) Prøver fra 2020, $f_{cm,28} = 43$ MPa

Figur 5-26: Midlere trykkfasthet, f_{cm} , plottet mot ekspansjon for prøver fra 2019 og 2020, 28-døgnsfasthet gitt i stiplet linje. Prøver testet laststyrt til brudd (LC) er markert med kryss

I figur 5-27a) og b) er $f_c/f_{c,ref}$ for de samme prøvene, som vist i tabell G-3 og G-4 i Vedlegg G, plottet mot ekspansjonen. Figur 5-27a) viser forholdet der 28-døgnsverdiene er benyttet som referanse og 5-27b) viser forholdet der det er tatt hensyn til en fasthetsøkning (fra terninger lagret ved 20 °C).

a) $f_{cm}/f_{cm,ref,28}$ plottet mot ekspansjonb) $f_{cm}/f_{cm,ref,just}$ plottet mot ekspansjon

Figur 5-27: Reduksjon av trykkfasthet $f_{cm}/f_{cm,ref}$, der referanseverdien er lik fastheten ved 28-døgn ($f_{cm,ref,28}$) og en justert referanse lik fra fasthetsutviklingen til terninger lagret ved 20 °C ($f_{cm,ref,just}$) plottet mot ekspansjon for prøver fra 2019 og 2020

Fastheten er antatt å bli noe lavere når prøvene er testet for arbeidsdiagram og ikke laststyrt til brudd. Ved arbeidsdiagram benyttes en lasthastighet på 0,3 % tøying pr. minutt til brudd, mens det ved en laststyrt test benyttes en hastighet på 0,6 MPa/s. Denne hastighetsforskjellen gjør at bruddlasten kan komme på et lavere nivå ved testing av arbeidsdiagram. Fasthetene funnet ved laststyrt test, vist i tabell G-2 i vedlegg G, er derfor antagelig noe høyere (5-10 %) enn de ville ha vært ved testing av arbeidsdiagram. Det samme gjelder 28-døgnsfasthetene (funnet ved prøving av terninger). Siden prøvene testet laststyrt er prøver fra de siste prøve-terminene, og derfor har relativt høye ekspansjoner, kan reduksjonen av trykkfastheten være større enn det som kommer frem fra figur 5-27 der alle verdiene er plottet sammen. Fra figur 5-26b), der også noen prøver med en noe lavere ekspansjon ble testet laststyrt til brudd, ser det imidlertid ikke ut som om prøvemethoden har så stor betydning for bruddspenningen. Prøvene fra kubene fra 2020 (runde datapunkt med sort kant) som er testet på ulike måter ser ut til å ha en gradvis reduksjon med ekspansjonen. Prøvene fra kube K20-2 (som er testet laststyrt) ser imidlertid ut til å ha en noe høyere bruddspenning enn prøvene fra kube K20-1 (som er testet for arbeidsdiagram), men dette kan også være fordi betongen til kube K20-2 har fått en fasthetsøkning da den er lagret lenger.

Figur 5-27 viser at sammenhengen er mye bedre når fasthetsutviklingen for terningene lagret ved 20 °C er benyttet som referanse. En ytterligere økning i referansefasthet ved 38 °C (pga. høyere temperatur) ville ført til en enda større fasthetsreduksjon for prøvene lagret ved 38 °C. I figur 5-27a) er spredningen spesielt stor for prøvene lagret ved 20 °C. De samme prøvene har også en viss spredning i figur 5-27b). Resultatene fra prøvene lagret ved 20 °C med små ekspansjoner ligger imidlertid rundt 0,8 i figur 5-27b). Dette betyr at referanseverdiene, som er funnet fra terninger og omgjort til sylindrefasthet, muligens er noe høyere enn kjernene fra kubene og prismene og de støpte sylindrene.

Fastheten til kjernene fra prøve FC38-5 er høyere sammenlignet med kjernene både fra 2., 3. og 4. termin. Kjernene fra retningen normalt på lasten (y-retning) på den belastede kubene fra 5. termin, RC38-5, er også ganske lik som tilsvarende prøver fra de andre terminene, selv om ekspansjonen er en del større. Dette kan tyde på at disse prøvene har fått en økt fasthet både

ved den ekstra lagringen ved 38 °C og ved 20 °C etter at ekspansjonen var stoppet opp. En kan også se noen lignende tendenser på resultatene til kjernene fra prismene fra 2019 som ble lagret ved 38 °C ved 1100 døgn. Dette gjelder spesielt for prismene med armering som kun viser en noe redusert fasthet sammenlignet med 28-døgnsverdien. Disse prøvene ble imidlertid alle testet laststyrt til brudd og ikke for arbeidsdiagram. Som vist i avsnitt 5.1.5 kan lastnivået påvirke skadeparameterne fra SDT. De høye fasthetene til disse prøvene kan derfor også ha bidratt til de lave SDI verdiene og reduksjon av E-modul sammenlignet med andre prøver på tilsvarende lastnivå.

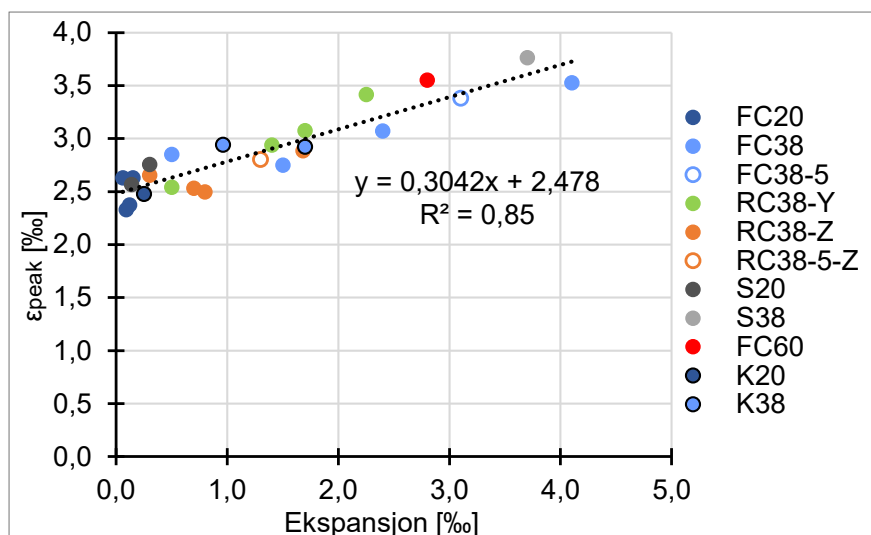
To prøver fra kube K20-2 lagret ved 20 °C ble testet laststyrt til brudd uten å ha blitt testet for SDT først. Trykkfasthetene til disse prøvene er vist i tabell 5-2. Prøver fra samme kube i z-retning, som også ble testet laststyrt, men testet for SDT først, fikk en fasthet på 44,2 og 43,7 MPa. Basert på disse prøvene, ser derfor prøvingen av SDT i forkant av trykkfastheten ut til å redusere fastheten med ca. 10 %. Ekspansjonen er forholdsvis lik i begge retninger (se tabell E-2 i vedlegg E. Prøvene ble også testet samme dag og har derfor lik lagringshistorikk. Det er likevel ikke helt sannsynlig at SDT skal redusere fastheten når lastnivået er så lavt som det som er benyttet i denne undersøkelsen (40 % av bruddspenning).

Tabell 5-2: Resultater trykkfasthet, f_c , for prøver fra kube K20-2

Prøve	f_c [MPa]
K20-2-y ₁	48,7
K20-2-y ₂	49,5

5.2.2 Tøyning ved bruddspenning, ϵ_{peak}

Figur 5-28 viser tøyningene til prøvene ved bruddspenning, ϵ_{peak} , fra arbeidsdiagram gitt i Tabell 5-10 og 5-11 plottet mot ekspansjonen. Merkingen av prøvene på denne figuren er lik som i tidligere figurer i avsnittet. Figuren viser en tydelig lineær sammenheng mellom denne tøyningen og ekspansjonen. Dette er også i samsvar med arbeidsdiagrammet i figur 5-25. Også prøvene fra 5. termin i 2019, FC38-5 og RC38-5-z ligger her på linje med de andre prøvene. En lineær regresjonslinje har en korrelasjonskoeffisient, R^2 , på 0,85. Prøvenes fasthet ser ikke ut til å bety noe for denne parameteren da det fra denne figuren ikke ser ut til å være noen systematisk forskjell og tøyningen fra både 2019 og 2020 ligger på linjen. Denne parameteren kan derfor være en bedre indikator på skade enn trykkfastheten fra arbeidsdiagrammene. Denne parameteren vil imidlertid være veldig avhengig av deformasjonshastigheten under prøvingen.

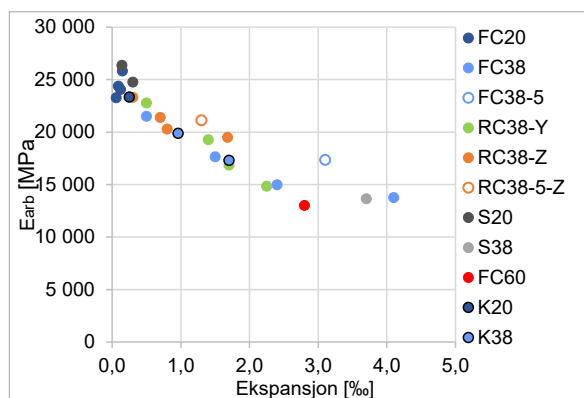


Figur 5-28: Tøyning ved bruddspenning fra arbeidsdiagram, ε_{peak} , mot ekspansjon for prøver fra 2019 og 2020 med lineær regresjonslinje

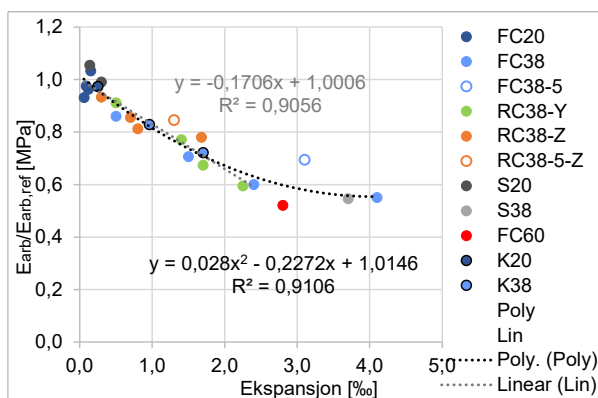
5.2.3 E-modul ved 40 % av bruddspenning, E_{arb}

I figur 5-29a) og b) er den gjennomsnittlige sekant E-modulen til prøvene funnet ved 40 % av bruddspenning fra arbeidsdiagram, E_{arb} , plottet mot ekspansjonen. Figur 5-29a) og b) viser henholdsvis sekant E-modulen og forholdet mellom denne og referanse E-modulen (25000 MPa for 2019-prøvene og 24000 MPa for 2020-prøvene). I likhet med sekant E-modulen funnet fra SDT er denne sammenhengen også god, og har en korrelasjonskoeffisient $> 0,9$ for både en polynomisk regresjonskurve og en lineær opp til en ekspansjon på 2,5 %. Prøvene fra den 5. terminen (FC38-5 og RC38-5-z) ser ut til å skille seg noe ut fra sammenhengen. Reduksjonen ser også her ut til å flate ut ved en ekspansjon større enn 2,5 %.

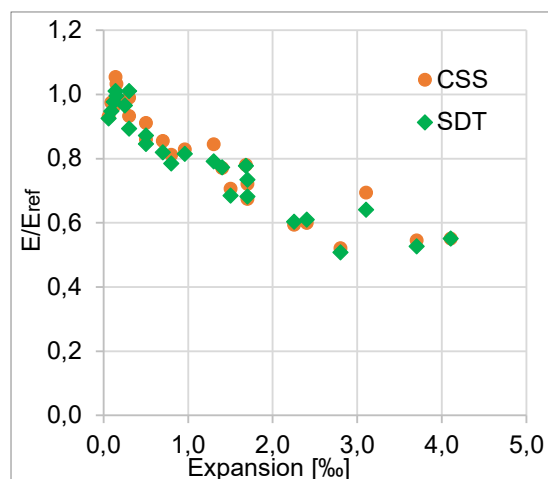
I figur 5-29c) er E_5/E_{ref} funnet fra SDT (fra femte sykel) plottet sammen med $E_{arb}/E_{arb,ref}$ funnet fra arbeidsdiagram (Compressive stress-strain test/CSS). Figuren viser at selv om E-modulen funnet fra arbeidsdiagram er en del lavere enn den funnet fra SDT, samsvarer de relative verdiene.



a) E_{arb} mot ekspansjon



b) $E_{arb}/E_{arb,ref}$ mot ekspansjon med lineær og polynomisk regresjonslinje



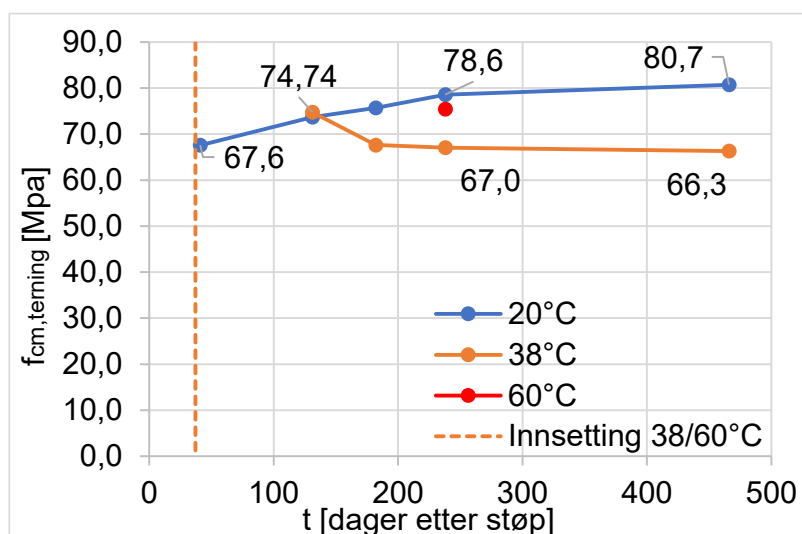
c) E_s/E_{ref} fra SDT (fra femte sykel) plottet sammen med $E_{arb}/E_{arb,ref}$ fra arbeidsdiagram (Compressive stress-strain tes/CSS)

Figur 5-29: Sekant E-modul ved 40 % av bruddlasten, E_{arb} og $E_{arb}/E_{arb,ref}$ plottet mot ekspansjon. $E_{arb,ref}$ er lik henholdsvis 25- og 24000 MPa for prøvene fra henholdsvis 2019- og 2020.

5.2.4 Trykkfasthet terninger

Referanseterningene fra 2019 ble testet for trykkfasthet ved 28-døgn og ved alle fire prøveterminene som vist i figur 3-2. Det ble støpt 27 stk. terninger. Alle bruddspenningene, beregnede sylindrefastheter og datoer for testing er vist i tabell G-5 i vedlegg G. Terningene ble lagret i samme bøtte som den frie kuben fra samme termin, som gitt i tabellen. Unntaket er terningene benyttet til 28-døgnsfasthet som er lagret i vann ved 20 °C før testing. Terningene som er lagret ved 38 °C ble innsatt i varmerommet ved en alder på 37 døgn.

Figur 5-30 viser fasthetsutviklingen for terningene lagret ved 20- og 38 °C. Alder er her døgn etter støp og tidspunkt for innsetting i 38 °C-rommet (37 døgn) er vist med oransje stiplet linje. Alle punktene for 38 °C linjen (oransje linje) er middelveiden av 3 terninger. Mens 2., 3. og 4. punkt for 20 °C linjen (blå linje) er middelveiden av 2 terninger (det ble støpt noen terninger mindre enn planlagt). Dette gjelder også prøvene lagret ved 60 °C (rødt punkt).



Figur 5-30: Fasthetsutvikling for terninger lagret ved 60- 38- og 20 °C

Resultatene viser at trykkfastheten blir noe redusert for terningene lagret ved 38 °C. Verdiene for sylinderfasthet ($f_{cm,cube} \cdot 0,8$) er også noe høyere enn det man finner fra kjernene boret fra kubene ved like terminer vist i tabell G-1. Da man ikke er sikre på hvordan terninger på 100x100 mm oppfører seg når de også har en AR-ekspansjon blir resultatene på 38- og 60 °C sett på som usikre. Jones and Clark [33] beskriver også at prøver med AR som testes direkte for trykkfasthet får en del større fasthet sammenlignet med borede kjerner da det kan ha oppstått leaching i det ytterste laget på de støpte prøvene som gjør at overflatene kan ha en del større fasthet. I labserien fra 2020 ble disse prøvene erstattet med testing av trykkfasthet fra kjerner boret fra ekspanderte bjelker. I tillegg ble referanseprøver lagret i vann ved 20 °C og testet både ved 28-døgn og ved de ulike bjelketerminene for å bestemme fasthetsutviklingen for uekspandert/uskadet betong. Dette vil bli dokumentert i rapporten for bjelkeprøvingen, Rapport 854 [15].

5.3 Påvirkning av frostsykler på SDT

Noen av prøvene boret fra ulike deler på Elgeseter bru og testet for SDT fikk, ganske høye SDI-verdier som diskutert i Stemland et al. [5]. Det ble her diskutert om at noe av årsaken kunne være at prøvene var utsatt for en kombinasjon av ASR og frost. Det ble derfor utført noen stikkundersøkelser for å undersøke effekten av frostpåkjenning på prøver fra frie kuber med ulike ekspansjonsnivå, henholdsvis ca., 0,3 ‰ (K20-1), 1,12 ‰ (K38-1), 1,21 ‰ (K38-2), 3,1 ‰ (FC38-5). Alle prøvene er fra kubenes z-retning. Disse prøvene ble alle pakket inn i plast og lagret ved 5 °C fra utboring ved avsluttet ekspansjon/lagring ved akselererte forhold til prøving. Prøvene var tvillinger på 2 og 2. De ble alle testet for SDT, med vanlig trykkfasthet til slutt (ikke arbeidsdiagram). En prøve fra hvert ekspansjonsnivå ble testet direkte for SDT og den andre etter forutgående frosteksposering iht. følgende ikke-standardiserte prosedyre: 1 uke neddykket i vann, deretter 10 døgn i fryseskap hvor temperaturen varierte fra +20 til -20 og tilbake til + 20 °C over døgnet (sykler som angitt i SN-CEN/TS 12390-9).

SDT resultatene er vist i tabell 5-3. Det skjedde noe med giverene under SDT prøvingen av referanseprøven for kubene uten ekspansjon, K20-1-z₁. Denne mangler derfor resultater fra SDT. Som tabellen viser har prøven utsatt for frostsykler en større SDI-verdi og lavere trykkfasthet enn tvillingprøvene som ikke er utsatt for frostsykler.

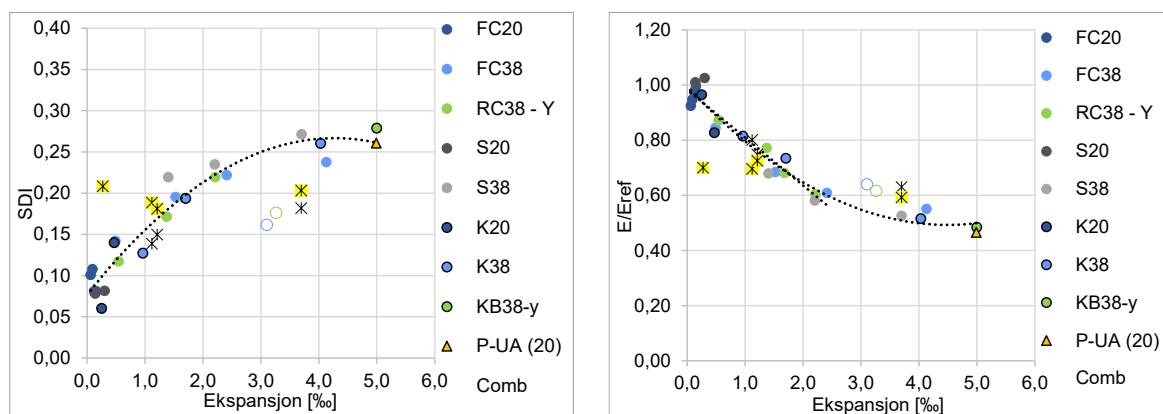
Tabell 5-3: Resultater fra SDT på Ø100x200 mm prøvesylindere utsatt for frostprøving

Prøve	ϵ_{AR} [‰]	E_{opp1} [MPa]	E_{ned1} [MPa]	E_{opp5} [MPa]	E_{ned5} [MPa]	E_5/E_{ref}	SDI	SDI _{alt}	Last- nivå [%]	f_c [MPa]
K20-1-z ₁	-	-	-	-	-	-	-	-	-	46,8
K20-1-z ₂ (Frost)	0,27	18205	23240	22255	22540	0,70	0,208	0,983	41,9	40,2
K38-1-z ₁	1,12	23461	26376	25555	25686	0,80	0,139	0,674	33,5	50,2
K38-1-z ₂ (Frost)	1,12	19366	23300	22244	22285	0,70	0,188	0,903	35,6	47,2
K38-2-z ₁	1,21	22003	24945	23854	24021	0,75	0,149	0,727	35,9	46,9
K38-2-z ₂ (Frost)	1,21	20117	24327	23087	23299	0,72	0,181	0,868	38,8	43,4
FC38-5-z ₁	3,71	18198	21262	20073	20235	0,63	0,182	0,879	47,9	46,8
FC38-5-z ₂ (Frost)	3,71	16694	20107	18844	19064	0,59	0,203	0,978	48,3	46,5

Resultatene for SDI og E_5/E_{ref} er vist sammen med resultat vist i 5-3b) og 5-13b) i figur 5-31a) og b). Frostprøvene er vist med gul markering rundt stjerneformede markører, mens tvillingene (uten frostsykler) er kun vist med stjerneformede markører. Resultatene viser at det er prøven med minst ekspansjon som ser ut til å være mest påvirket av frostsyklene, mens prøven med den høyeste ekspansjonen, ser ut til å være minst påvirket. Dette er litt uventet ettersom denne har flest riss og dermed størst potensiale for frostsprengning i rissene. Prøvene ble vannmettet før frosteksposering, men lå i luft under frosteksposeringen. Dette kan ha medført at vann fra de største rissene har rent ut og at det ellers har skjedd en raskere uttørking av prøvene med mest opprissing. Betongen er heller ikke tilsatt luft. Den ureagerte referansen har derfor ingen

luftporestruktur som beskytter mot frostnedbrytning. Betong med en viss opprissing kan imidlertid ha fått et ureglementert system av riss/hulrom som til en viss grad beskytter under frosteksposering.

Prøvene med det høyeste ekspansjonsnivået kommer fra kube FC38-5. Som tidligere diskutert viste de prøvde kjernene fra denne kuben en lavere skadegrad enn forventet sammenlignet med andre prøver ved tilsvarende ekspansjon. Dette stemmer også med prøven uten frost fra denne undersøkelsen. Resultatene i y-retning fra FC38-5 og kuben med belastning som var lagret like lenge (RC38-5) er derfor vist i figur 5-31a) og b) for sammenligning (markører uten fyll).

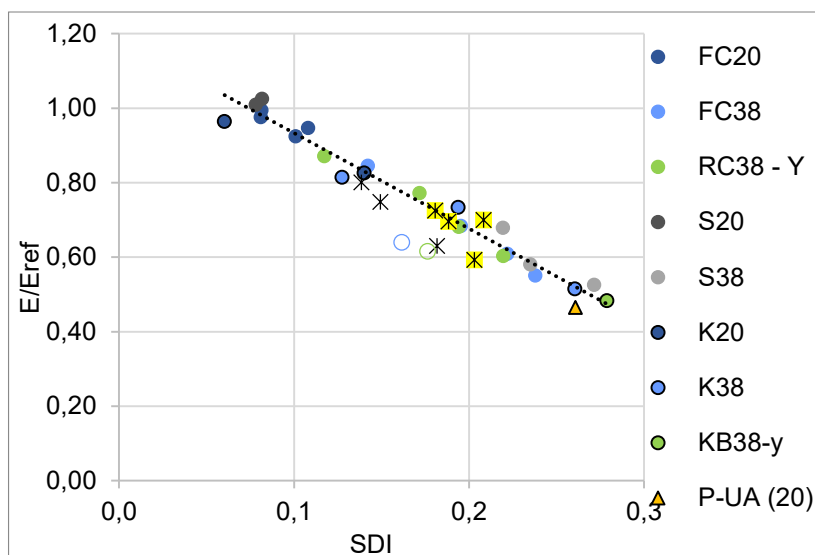


a) SDI prøver utsatt for frostforsøk vist med stjerneformet markør med gul bakgrunn sammen med resultater fra figur 5-3b) + FC38-5-y og RC38-5-y (blå og grønn markør uten fyll)

b) E_5/E_{ref} for prøver utsatt for frostforsøk vist med stjerneformet markør med gul bakgrunn sammen med resultater fra figur 5-13b) + FC38-5-y og RC38-5-y (blå og grønn markør uten fyll)

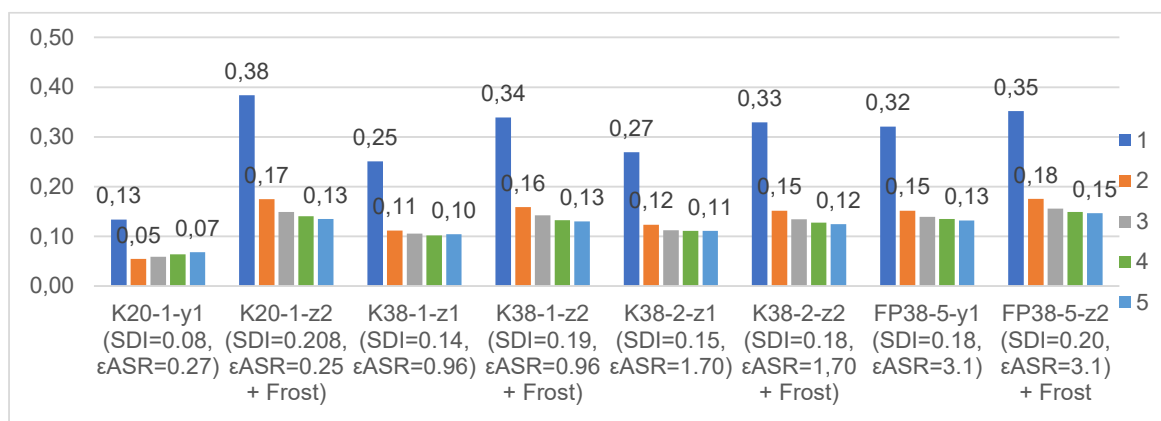
Figur 5-31: Resultater for SDI og E/E_{ref} fra prøver utsatt for frostprøving. Referanse (uten frostsykler) er gitt som stjernemarkør uten fyll. Prøver med frostsykler har stjernemarkør med gult fyll)

Figur 5-32 viser sammenhengen mellom E_5/E_{ref} og SDI for tilsvarende prøver som i figur 5-31a) og b). Denne figuren viser at prøvene med frostsyklene ser ut til å ligge på linje med tidligere resultater fra frie retninger. Dette betyr at frostsyklene påvirker begge skadeparameterne like mye. Unntaket er prøvene fra FC38-5 som i likhet med tidligere testede kjerner fra denne kuben, ser ut til å vise en noe større skadegrad fra SDI enn E_5/E_{ref} .



Figur 5-32: E_5/E_{ref} plottet mot SDI for prøver utsatt for frostprøving vist med resultater fra figur 5-14c) og FC38-5-y og RC38-5-y (markert med blå og grønn ring). Referanse (uten frostsykler) er gitt som stjernemarkør uten fyll. Prøver med frostsykler har stjernemarkør med gult fyll

I figur 5-33 er bidraget til SDI fra hver lastsykel for prøvene i tabell 5-3 vist. På grunn av at det skjedde noe med giveren under testing av prøve K20-1-z₁, er bidragene til prøve K20-1-y₁, som er fra samme prøve og antatt å ha ganske lik oppførsel, tatt med som sammenligning. Figuren viser at frostsyklene ikke ser ut til å påvirke noen lastsykler mer enn andre.



Figur 5-33: Forhold mellom forbrukt og påført energi i hver sykel (1-5) for prøver utsatt for frostsykler + referanser

6. SAMMENDRAG OG KONKLUSJONER

Denne rapporten presenterer resultater fra to eksperimentelle undersøkelser av akselererte laboratorieprøver (38°C, 100 % RF) av alkalireaktiv betong. Betongreseptene inneholder alkali-reaktivt norsk tilslag (Ottersbo 4-16 mm), har et alkali-innhold på 5,6 Na₂O_{eq} og v/c-tall på hhv. 0,47 og 0,54. Betongen er antatt å være representativ for en del norske bruer bygd på 1950 -60 tallet. Undersøkelsene er utført på frie- og enaksielt belastede kuber, samt armerte og uarmerte prizmer. En serie med prøver er fra 2019 og en oppfølgende serie er fra 2020. Undersøkelsene etterfølger tidligere arbeid utført av Kongshaug et al. [14], men inneholder supplerende prøvetyper (armerte og uarmerte prizmer) og har endrede lagringsbetingelser (fra 60 °C to 38 °C). Hovedformålet med forsøkene er å undersøke ekspansjonsforløpet til prøver med ulik form for belastning i ulike retninger og materialelegenskaper/skadeparametere ved ulike ekspansjonsnivå.

Prøveserien fra 2019 bestod av 15 stk. 230 mm kuber, 10 stk. Ø150x300 mm sylindre og 27 stk. 100 mm terninger. I tillegg ble det støpt 6 stk. 230x230x300 mm prizmer; derav 2 stk. uarmerte, 2 stk. med 4 Ø10 mm stenger (0,6 % armering) og 2 stk. med 4 Ø16 mm stenger (1,5 % armering).

Prøvene fra 2020 repeterer undersøkelsene gjort i prøveserien fra 2019 med noen justerte prøver (justert armeringsmengde i prismene) og med en litt annen betongresept med en noe lavere sylindrefasthet, $f_{cm,28} = 54$ MPa for 2019-serien ($0,8 \cdot$ terningfasthet) og 43 MPa for 2020-serien. Den består av 6 stk. 230 mm kuber og 4 stk. 230x230x300 mm prizmer; 1 stk. uarmert, 1 stk. med 4 Ø16 mm stenger (1,5 % armering) og 2 stk. med 4 Ø20 mm stenger (2,4 % armering).

Fem av kubene fra prøveserien i 2019 og en av kubene fra 2020 ble belastet i en retning, definert som z-retningen, av et last-system med lastcelle som gir en konstant trykkspenning på 3 MPa under hele ekspansjonsforløpet. Armeringsstengene i prismene er symmetrisk om begge akser, sveiset fast til stålplater ved endeflatene.

De ulike prøvene ble ekspandert til ulike ekspansjonsnivå (ca. 0,5, 1,0, 1,5 og $\geq 3,0$ ‰) før de ble testet for ulike skadeparametere og materialelegenskaper. Prøvene ble også jevnlig målt i ulike retninger for å undersøke effekten av ulik type fastholding på ekspansjonen. En prøvemethode kalt «Stiffness Damage Test» (SDT), som består av fem lastvekslinger til en trykkspenning opp til 40 % av prøvens 28-døgnsfasthet, ble hovedsakelig benyttet til prøvingen, i tillegg til prøving av arbeidsdiagram og trykkfasthet. Prøvingen av kuber og prizmer ble utført på Ø95x190 mm sylindre, boret i ulike retninger. De Ø150x300 mm støpte sylindrene ble prøvd direkte.

Hovedresultatene fra SDT er en «*Stiffness Damage Index*» (SDI), som er forholdet mellom summen av hysteresen eller forbrukt energi og totalt tilført energi for alle fem lastsykler, og sekant E-modulen av den siste på- og avlastingskurven (nr. 5) delt på en referanse E-modul for uskadet betong (E_s/E_{ref}). I tillegg er også noen alternative SDI-verdier, som å summere delbidragene fra hver sykel eller å kun inkludere noen sykler, en «*Plastic deformation index*»

(*PDI*) og en «*Non-linearity index*» (*NLI*) diskutert. Fra arbeidsdiagrammene er tøyningen ved maks last, ϵ_{peak} , og sekant E-modulen opp til 40 % av maks last, E_{arb} , også diskutert i tillegg til trykkfastheten.

Hovedresultatene og konklusjonene fra undersøkelsene, inndelt etter resultater fra kapittel 4 og 5 er:

Ekspansjon

- Spredningen i ekspansjonsmålingene pr. prøve er ganske stor i fri retning av de belastede/armerte prøvene, med variasjonskoeffisienter mellom 12,9- og 20,1 %. Dette er også i samme område som spredningen mellom enkeltmålingene i de ulike retningene på de frie prøvene. Hvis en sammenligner gjennomsnittlig fri ekspansjon for hver prøve er imidlertid spredningen mellom ulike parallelle prøver mye lavere. Dette gjelder både parallelle prøver i samme serie og sammenlignbare prøver fra ulike serier (2019 vs. 2020 og kuber vs. prismene). Dette viser at enkeltmålinger kan være villedende, men at en gjennomsnittlig verdi av flere målinger er representativ for ekspansjonen. Det viser også at ekspansjonsutviklingen til prøvene fra de to seriene er like selv om prøvene fra 2020 har en noe lavere fasthet/høyere v/c -tall.
- I kubenes belastede retning og armeringsretningen til prismene er spredningen noe mindre enn i fri retning, med en variasjonskoeffisient mellom 7 og 17 %. Spredningen er imidlertid spesielt høy for den belastede kubene fra 2020-serien ($\approx 50\%$).
- Gjennomsnittsmålingene til både de belastede kubene og prismene med 4Ø16 mm stenger, utført hhv. i 2019 og 2020, samsvarer imidlertid godt for de to undersøkelsene, noe som validerer konklusjonene til de frie prøvene.
- Ekspansjonen er redusert i belastet retning og i armeringsretningen sammenlignet med fri retning. Ekspansjonskurvene for fri og fastholdt retning, både for de belastede kubene og de armerte prismene, begynner å skille seg fra hverandre etter omtrent 80 døgn, dvs. ved en ekspansjon på omtrent 0,4 ‰.
- Noen undersøkelser har vist en økt ekspansjon i de frie retningene på en prøve utsatt for en trykkspenning i en eller flere retninger sammenlignet med en prøve uten belastning (fri prøve). En slik effekt kan delvis bli sett på de armerte prismene fra 2019, der ekspansjonen til de armerte prismene i tverretning er større enn for de uarmerte prismene og større for prismene med mest armering (P-Ø16). De belastede kubene fra begge seriene viser imidlertid ingen slik effekt, mens de armerte prismene fra 2020 har en motsatt effekt, der ekspansjonen til det uarmerte prismet er størst i både lengde- og tverretning. Resultatene til prismene fra 2019 skyldes derfor mest sannsynlig spredning i prøvenes fri retninger. Målingene av de frie retningene på de fastholdte prøvene blir derfor benyttet til å bestemme prøvenes frie ekspansjon. En form for belastning vil dermed redusere den totale skaden fra AR (den volumetriske ekspansjonen blir mindre).
- Ekspansjonene til kubene som ble belastet med en trykkspenning på 3 MPa stopper/flater ut etter omtrent 200 døgn, dvs. ved en ekspansjon på ca. 1 ‰. Forholdet mellom fastholdt og fri ekspansjon er på dette tidspunktet ca. 0,6. Da den frie ekspansjonen fortsetter å øke vil imidlertid forholdet bli ytterligere redusert, ca. 0,5 ved

en fri ekspansjon på 2 ‰ og 0,35 mot slutten av prøveperioden ved en fri ekspansjon på ca. 4 ‰.

- Ekspansjonen til de armerte prismene, der trykkspenningene bygger seg opp i betongen med økende ekspansjon, flater ikke ut på samme måte som for de belastede kubene. Ved en fri ekspansjon på 2 ‰ er forholdet mellom fastholdt og fri ekspansjon ca. 0,65, 0,60 og 0,57 for prismene med henholdsvis 4Ø10, 4Ø16 og 4Ø20 mm stenger ($\rho = 0,6$ -, 1,5- og 2,4 ‰). Ved frie ekspansjoner > 2 ‰ er forholdet mellom fastholdt og fri ekspansjon for prismene med 4Ø10 mm tilnærmet konstant, mens forholdet for prismene med 4Ø16 og 4Ø20 mm fortsatt får en gradvis reduksjon frem til en fri ekspansjon på ca. 4 ‰ hvor også disse flater ut. Forholdet er da hhv. ca. 0,55 og 0,50. Reduksjonen av ekspansjonen i prismenes armeringsretning blir dermed aldri større enn reduksjonen i kubenes belastede retning, selv om trykkspenningene i prismene med 4Ø20, 4Ø16 og 4Ø10 mm stenger overstiger 3 MPa etter omtrent 120, 155 og 400 døgn.
- Hvis en kryptøyning beregnet etter Model Code 2010 blir trukket fra de målte ekspansjonene til de armerte prismene blir forskjellen i ekspansjon i lengde/armeringsretningen mindre mellom prismene med ulike armeringsmengde. Ved en fri ekspansjon på 3 ‰ er forholdene henholdsvis 0,66, 0,64 og 0,62 for prismene med 4Ø10-, 4Ø16 og 4Ø20 mm stenger. Dette er omtrent 20 ‰ mindre reduksjon i fastholdt retning sammenlignet med de belastede kubene (der elastisk deformasjon og mesteparten av kryptet ikke er inkludert i målingene) ved samme nivå av fri ekspansjon.
- Resultatene viser at når og hvordan trykkspenningen blir påført prøvene har mye å si for hvor mye ekspansjonen i fastholdt retning blir redusert. En mulig årsak til ekspansjonsforskjellene mellom de belastede kubene og de armerte prismene er at prismene, som er uten spenning tidlig i ekspansjonsforløpet, kan etablere mikroriss i mer vilkårlige retninger sammenlignet med kubene som er belastet fra starten og som dermed vil få mest opprissing i retningen parallelt med belastingen. Siden det er lettere for et allerede eksisterende riss å utvikle seg enn det er å utvikle ett nytt riss, kan de allerede initierte rissene i prismene fortsette å utvikle seg selv om trykkspenningene etter hvert blir store. Dette kan derfor delvis også forklare at det ikke er så stor forskjell i ekspansjonen til prismene med de ulike armeringsmengdene.

SDT, arbeidsdiagram og trykkfasthet

- Spennings-/tøyningskurvene fra SDT viser økte tøyninger og hysteresereale med økt ekspansjon. Når de er plottet mot ekspansjonene viser både SDI og E_5/E_{ref} -verdiene til de ulike prøvestykkene en ganske lineær økning frem til en ekspansjon på ca. 2 ‰. Etter dette punktet flater sammenhengen mer ut og det blir større spredning i resultatene. En mulig forklaring kan være at den økte ekspansjonen > 2 ‰ hovedsakelig skyldes at eksisterende riss utvikles og blir fylt med reaksjonsprodukt, noe som kan påvirke mengden energi som kreves for å lukke rissene slik at SDI og E_5/E_{ref} verdiene vil flate ut. Resultatene ved høyere ekspansjoner kan også bli påvirket av at større overflateriss gjør at den målte ekspansjonen kan være større enn ekspansjonen lenger inn i prøvestykkene.

- Når alle resultatene er plottet har en polynomisk regresjonslinje en korrelasjonskoeffisient, R^2 , lik 0,63 og 0,86 for henholdsvis SDI og E_5/E_{ref} . Resultatene mellom de to seriene med noe ulik fasthet ser ut til å stemme overens. Resultatene ser også ut til å samsvare bra med de fra Kongshaug et al [14] der prøvene var lagret ved 60 °C. Resultatene ligger i nedre grense sammenlignet med resultatene fra Sanchez et al. [32].
- Resultatene som skiller seg mest ut fra SDI- og E_5/E_{ref} sammenhengene med ekspansjonen er kubene fra femte termin (FC38-5 og RC38-5) og prismene fra 2019-serien, som har lavere SDI-verdier/lavere reduksjon i E-modul sammenlignet med andre prøvestykker med tilsvarende ekspansjon. Felles for disse prøvene er at de alle ble lagret i over 800 dager før de ble testet (kubene v/ 20 °C etter uttak fra 38 °C. En mulig årsak til disse resultatene kan både være en økt mengde reaksjonsprodukt i rissene og at reaksjonsproduktene også endrer egenskaper over tid som igjen fører til en stivere oppførsel.
- Tilsvarende som for ekspansjonen, viser skadeparameterne fra SDT også en lavere skadegrad fra kjernene i fastholdt retning sammenlignet med fri retning, noe som gir en anisotrop materialoppførsel.
- SDI-verdiene fra belastede/armerte retninger har også lavere SDI-verdier og lavere reduksjon i E-modul sammenlignet med prøver fra fri retninger ved samme ekspansjon > 1 ‰. Dette er antagelig på grunn av at disse prøvene primært risser opp i lastretningen. Disse prøvene har også en høyere alder enn prøvene fra frie retninger ved samme ekspansjonsnivå som også kan påvirke resultatene.
- Hvis kun resultatene i fri retning er inkludert (sett bort ifra prøvene fra 5. termin fra 2019), er sammenhengene med ekspansjonen ganske god og en polynomisk regresjonslinje gir R^2 lik 0,93 og 0,95 for sammenhengen med henholdsvis SDI og E_5/E_{ref} . Disse datasettene inkluderer både prøver fra frie kuber (uten belastning) og prøver fra frie retninger på belastede kuber som derfor har ulik ekspansjon i prøvenes tverretning. Det at verdiene samsvarer viser at det hovedsakelig er ekspansjonene i prøvenes lengderetning som har betydning for skadeparameterne fra SDT.
- Verdiene fra de støpte Ø150x300 mm sylindrene samsvarer også med de andre frie prøvene som viser at forholdet mellom SDI og ekspansjon er likt uavhengig av om ekspansjonene er målt direkte på prøvesylindrene eller på overflaten av prøver prøvesylindrene er boret fra.
- SDI og E_5/E_{ref} - verdiene samsvarer godt med hverandre og har en R^2 lik 0,86 for en lineær regresjonslinje når de er plottet mot hverandre. Prøvene som avviker fra sammenhengene med ekspansjonen avviker imidlertid mer for SDI enn for E_5/E_{ref} . Da E-modulen generelt er mer påvirket av stivheten til tilslagene enn pastaen kan derfor denne parameteren være mindre sensitiv for belastning og effekten av reaksjonsproduktene på prøver lagret over lengre tid sammenlignet med SDI. Det er spesielt bidraget fra den første sykkelen på SDI som er lavere for disse prøvene sammenlignet med frie prøver ved samme ekspansjon. Da E_5 er bestemt fra den femte sykkelen blir derfor antagelig denne skadeparameteren også mindre påvirket av disse effektene. Samtidig er denne skadeparameteren avhengig av en referanse E-modul som kan være vanskelig å bestemme for prøver fra eksisterende konstruksjoner.

- De alternative SDI verdiene, ved å summere delbidragene fra hver sykel (SDI_{alt}) eller å kun inkludere noen sykler (SDI_2) viste kun marginale forskjeller sammenlignet med den originale SDI-verdien.
- PDI og NLI verdiene plottet mot ekspansjon gir stor spredning i resultatene. Det har i tidligere undersøkelser [22] vært diskutert at NLI-verdien skal si noe om rissorienteringen til prøvene da dette vil påvirke formen på spennings-tøyings kurvene. Alle prøvene fra denne undersøkelsen gir imidlertid en $NLI > 1$ ($E_{opp,50\%} > E_{opp}$) som vil si at kurvene har en konkav form/buer innover. Kurvene viser imidlertid en mer konkav form etter flere sykler.
- Det er vanskelig å bestemme en effekt av AR på trykkfastheten da forsøkene påvirkes av en rekke forhold som vil slå forskjellig ut, som lagringsbetingelser, temperatur, alder og prøvingsform. Undersøkelsen viser kun en begrenset reduksjon i trykkfasthet på omtrent 20 % for de mest ekspanderte prøvene ($> 3 \%$). Spredningen er imidlertid stor.
- Arbeidsdiagrammene viser at prøvene får en mer duktil oppførsel ved at kurvene får et lavere toppunkt (lavere fasthet) og en større tøyning/forskyvning før toppunktet nåes med økt ekspansjon. Kurvene fra prøver i belastet retning får imidlertid ganske lik tøyning for alle ekspansjonsnivå, mens fastheten, f_{cm} , går ned for prøvene fra 2. og 3. termin, før den øker igjen for 4. og 5. termin.
- Tøyningen ved maks last, ϵ_{peak} , har en ganske lineær sammenheng med ekspansjonen. Ut fra dette, kan derfor "peak/topp" tøyningen se ut til å være en bedre indikator på ekspansjonsnivået enn selve fastheten. Denne parameteren vil imidlertid være ganske følsom for deformasjonshastigheten under prøvingen.
- Sekant E-modulen fra arbeidsdiagrammene ved 40 % av maks spenning er generelt lavere enn E-modulene funnet fra SDT. De relative verdiene (E/E_{ref}) er imidlertid ganske like.

Referanser

1. Leemann, A. M. Góra, B. Lothenbach and M. Heuberger, "Alkali silica reaction in concrete - Revealing the expansion mechanism by surface force measurements". *Cement and Concrete Research*, 2024. **176**: p. 107392.
2. Doran, D.K. (Chairman of Task Group): "Structural Effects of Alkali-Silica Reaction: Technical Guidance on the Appraisal of Existing Structures" *The Institution of Structural Engineers*, 1992. Great Britain.
3. Stemland H, Rodum E, & Johansen H: "ASR – Veiledning for konstruktiv analyse". *Statens Vegvesen Rapport nr. 601*, 2015. Oslo, Norge
4. Stemland, K.M., H. Johansen, and T. Kanstad. "Load Effects of ASR-induced Expansion in Reinforced Concrete and Their Consequences for Structural Assessment" *Nordic Concrete Research*, 2023. **68**(1): p. 39-63.
5. Stemland K, Rodum E & Kanstad T: "Stiffness damage testing of laboratory-cast alkali-silica reactive concrete and cores drilled from an existing concrete structure". *Proceedings to the 16th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR)*. Lisbon, Portugal. 2022.
6. Sanchez, L.F.M., Fournier, B., Jolin, M., Duchesne, J., & Mitchell, D. "Practical use of the Stiffness Damage Test (SDT) for assessing damage in concrete infrastructure affected by alkali-silica reaction." *Construction and Building Materials*, 2016. 125: p. 1178-1188
7. Larive, C. "*Apports Combinés de l'Expérimentation et de la Modélisation à la Compréhension de l'Alcali-Réaction et de Ses Effets Mécaniques*". 1997, École Nationale des Ponts et Chaussées.
8. Berra, M., et al. "Influence of Stress Restraint on the Expansive Behaviour of Concrete Affected by Alkali-Silica Reaction." *Cement and Concrete Research*, vol. 40, no. 9, 2010, pp. 1403-1409.
9. Zahedi, A., C. Trottier, L. Sanchez, and M. Noël. "Evaluation of the Induced Mechanical Deterioration of Alkali-Silica Reaction Affected Concrete Under Distinct Confinement Conditions Through the Stiffness Damage Test." *Cement and Concrete Composites*, vol. 126, 2022, p. 104343.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104343>
10. Dunant, C., and K. Scrivener. "Effects of Uniaxial Stress on Alkali-Silica Reaction Induced Expansion of Concrete." *Cement and Concrete Research*, vol. 42, 2012, pp. 567-576.
11. Gautam, B., D. Panesar, S. Sheikh, and F. Vecchio. "Effect of Multiaxial Stresses on Alkali-Silica Reaction Damage of Concrete." *ACI Materials Journal*, vol. 114, 2017.
<https://doi.org/10.14359/51689617>.
12. Wald, David M., Morgan T. Allford, Oguzhan Bayrak, and Trevor D. Hrynyk. "Development and Multiaxial Distribution of Expansions in Reinforced Concrete Elements Affected by Alkali-Silica Reaction." *Structural Concrete*, vol. 19, no. 6, 2017, pp. 914-928. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/suco.201600220>
13. Kagimoto, H., Y. Yasuda, and M. Kawamura. "ASR Expansion, Expansive Pressure and Cracking in Concrete Prisms Under Various Degrees of Restraint." *Cement and Concrete Research*, vol. 59, 2014, pp. 1-15.
14. Sørgaard Kongshaug, S., O. Oseland, T. Kanstad, M. Hendriks, E. Rodum, and G. Markeset. "Experimental Investigation of ASR-Affected Concrete - The Influence of

- Uniaxial Loading on the Evolution of Mechanical Properties, Expansion, and Damage Indices." *Construction and Building Materials*, vol. 245, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118384>.
15. Stemland, K.M., "Skjærforsøk av AR-ekspanderte bjelker. Alkalireaksjoner i betong." *Statens vegvesen rapport nr. 854*. 2022. Oslo, Norway
 16. Stemland, K.M., *Experimental and Structural Basis for Analysis and Assessment of Concrete Structures exposed to Alkali-Silica Reactions*. 2024. NTNU. PhD-thesis.
 17. Rodum, E., Pedersen, B.M., Skjølsvold, O., Champagne, M., Lindgård, J., "Effect of different field exposure conditions and surface treatments on internal relative humidity (RH) and expansion", *Proceedings to the 16th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR)*. Lisbon, Portugal. 2022.
 18. Kirkhaug, J.R., *Alkali-Silica Reactions – Influence on expansion, damage parameters and Mechanical Properties with and without Uniaxial Stress Restraint*, (Master thesis), 2019, NTNU: Trondheim, Norway.
 19. Norwegian Concrete Association "NB32: Alkali-aggregate reactions in concrete, Test methods and Requirements to Test Laboratories.", 2005
 20. Lindgård, J. *Alkali-Silica Reaction (ASR) - Performance Testing*. 2013. Norwegian University of Science and Technology (NTNU), PhD thesis.
 21. Crouch, R.S. and J. Wood, "Damage evolution in AAR affected concretes." *Engineering Fracture Mechanics*, 1990. **35**: p. 211-218.
 22. Chrisp, T.M., P. Waldron, and J.G.M. Wood. "Development of a Non-Destructive Test to Quantify Damage in Deteriorated Concrete." *Magazine of Concrete Research*, vol. 45, no. 165, 1993, pp. 247-256.
 23. Smaoui, N., Bérubé, M.A., Fournier, B., Bissonnette, B., & Durand, B "Evaluation of the expansion attained to date by concrete affected by alkali-silica reaction. Part I: Experimental study." *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2004. 31(5): p. 826-845.
 24. Giannini, E. and K. Folliard. "Stiffness damage and mechanical testing of core specimens for the evaluation of structures affected by ASR" *Proceedings of the 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. 2012.
 25. Sanchez, L.F.M., Fournier, B., Jolin, M., & Duchesne, J., "Evaluation of the stiffness damage test (SDT) as a tool for assessing damage in concrete due to ASR: Test loading and output responses for concretes incorporating fine or coarse reactive aggregates." *Cement and Concrete Research*, 2014. **56**: p. 213-229.
 26. Oseland, O., *The effect of accelerated ASR on the mechanical properties and degree of damage of concrete over time - with and without uniaxial compressive stress*. (Master thesis), 2018, NTNU, Trondheim, Norway.
 27. Standard Norge. "NS-EN 12390-3:2009 Testing Hardened Concrete – Part 3: Compressive Strength of Test Specimens." Oslo, Norway
 28. Smaoui, N., B. Bissonnette, M. Bérubé, and B. Fournier. "Influence of Specimen Geometry, Orientation of Casting Plane, and Mode of Concrete Consolidation on Expansion Due to ASR." *Cement Concrete and Aggregates*, vol. 26, 2004, pp. 1-13. doi:10.1139/L07-063.
 29. Multon, S., and F. Toutlemonde. "Effect of Applied Stresses on Alkali-Silica Reaction-Induced Expansions." *Cement and Concrete Research*, vol. 36, 2006, pp. 912-920
 30. Sanchez, L., *Contribution to the assessment of damage in aging concrete infrastructures affected by alkali-aggregate reaction*. (Phd-thesis), 2014, University of Ottawa

31. fib. *"Model Code 2010 - First Complete Draft, Volume 1"*. fib Bulletin No. 55, 2010. International Federation for Structural Concrete (fib), ISBN: 978-2-88394-095-6.
<https://doi.org/10.35789/fib.BULL.0055>
32. Sanchez, L. F. M., B. Fournier, M. Jolin, D. Mitchell, and J. Bastien. "Overall Assessment of Alkali-Aggregate Reaction (AAR) in Concretes Presenting Different Strengths and Incorporating a Wide Range of Reactive Aggregate Types and Natures." *Cement and Concrete Research*, vol. 93, 2017, pp. 17-31.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.12.001>
33. Jones, A.E.K., and L.A. Clark. "The Effects of ASR on the Properties of Concrete and the Implications for Assessment." *Engineering Structures*, vol. 20, no. 9, 1998, pp. 785-791
34. Wen, Hong Xing. *Prediction of Structural Effects in Concrete Affected by Alkali-Aggregate Reaction*. (Phd-thesis), 1993, University of Plymouth
35. Jinawath, P. *Cumulative Fatigue Damage of Plain Concrete in Compression*. 1974, University of Leeds

VEDLEGG A: ENKELTMÅLINGER EKSPANDERTE KUBER 2019

Alle disse kubene har referansemålinger både ved 20 °C og etter temperaturutvidelse ved 38 °C. Tilsvarende målinger ble også utført når kubene var ferdig ekspandert. Tabellene og figurene viser derfor begge målinger. På grunn av spenningshistorikken til de belastede prøvene trenger disse verdiene ikke være helt like for disse prøvene. Det er 38 °C målingene som blir sett på som mest riktige og er derfor de som blir benyttet som middelverdier i rapporten.

A.1: Kube FC38-1 og RC38-1

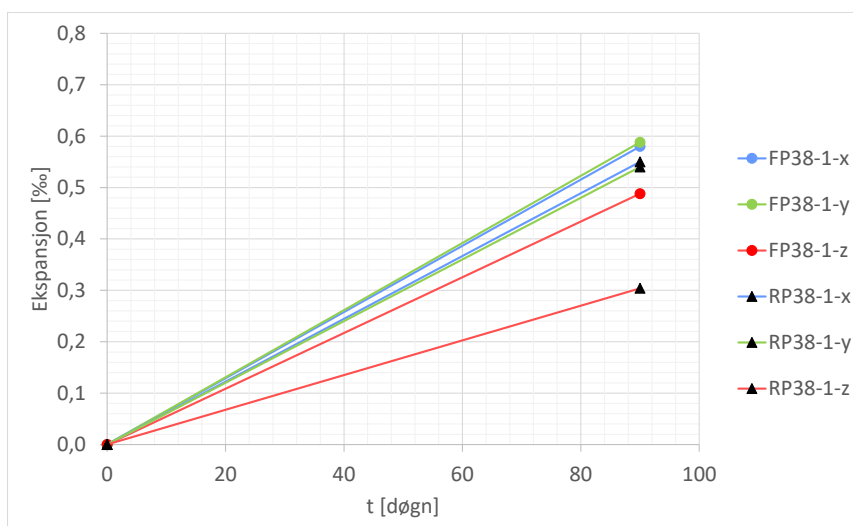
I figurene er RC38 og FC38 annotert med henholdsvis FC38 og RC38.

Tabell A-2: Enkeltnmålinger ved 20- og 38 °C for kube FC38-1

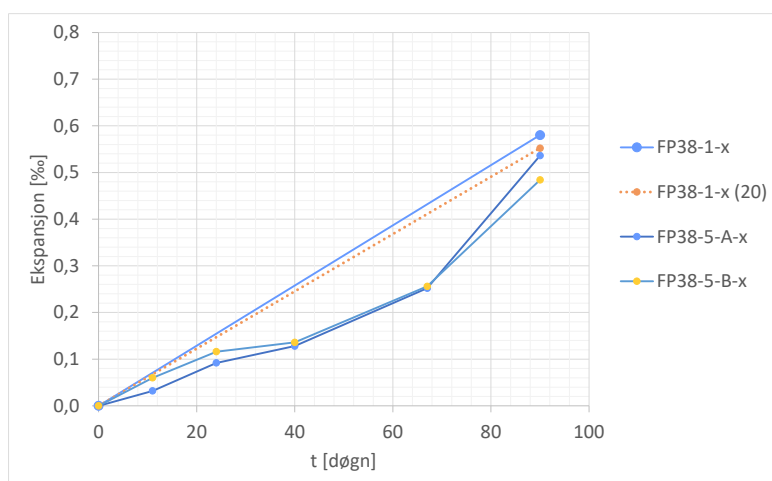
Døgn	FC38-1-x	FC38-1-y	FC38-1-z
38°C-målinger			
90	0,580	0,588	0,488
20°C-målinger			
90	0,552	0,536	0,464

Tabell A-3: Enkeltnmålinger ved 20- og 38 °C for kube RC38-1

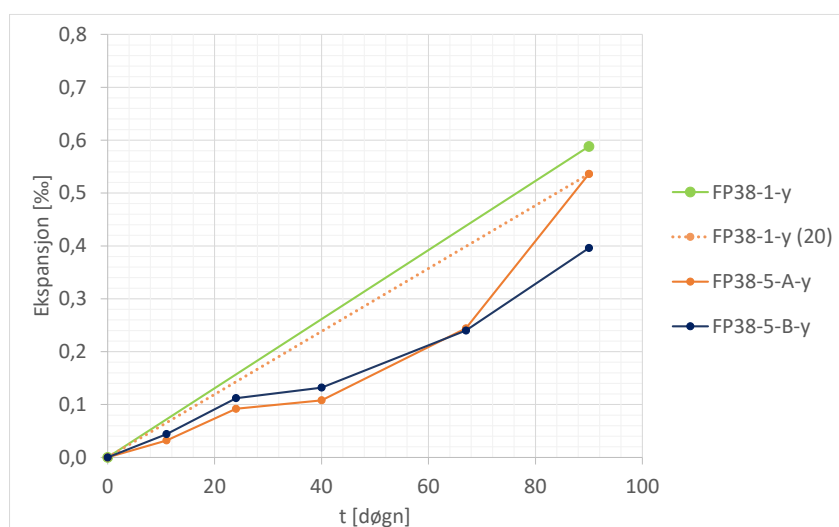
Døgn	RC38-1-x	RC38-1-y	RC38-1-z	RC38-1-	RC38-1-
38 °C-målinger					
90	0,550	0,540	0,304	0,176	0,432
20 °C-målinger-digital					
90	0,472	0,420	0,464	0,128	0,432
20 °C-målinger-analog					
90	0,44	0,400			



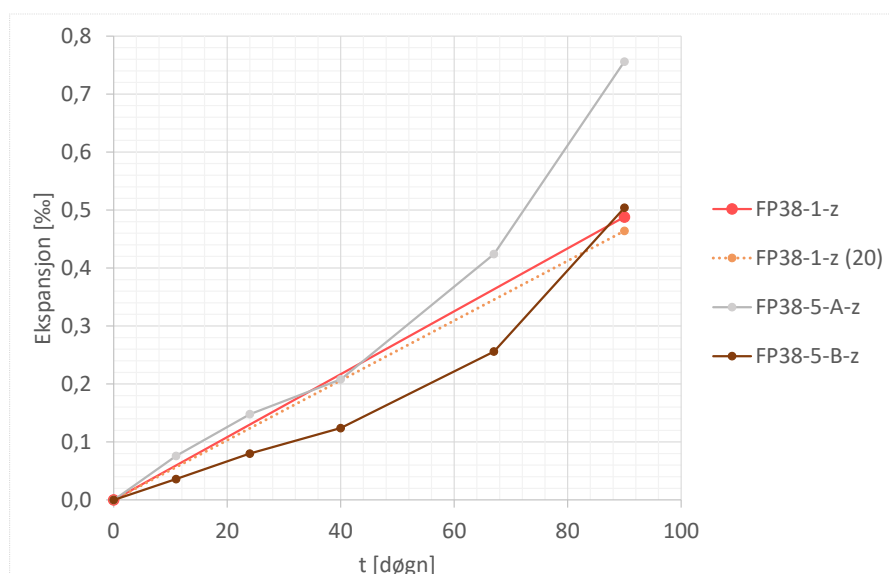
Figur A-1: Enkeltnmålinger ved 38 °C for kuber FC38-1 og RC38-1



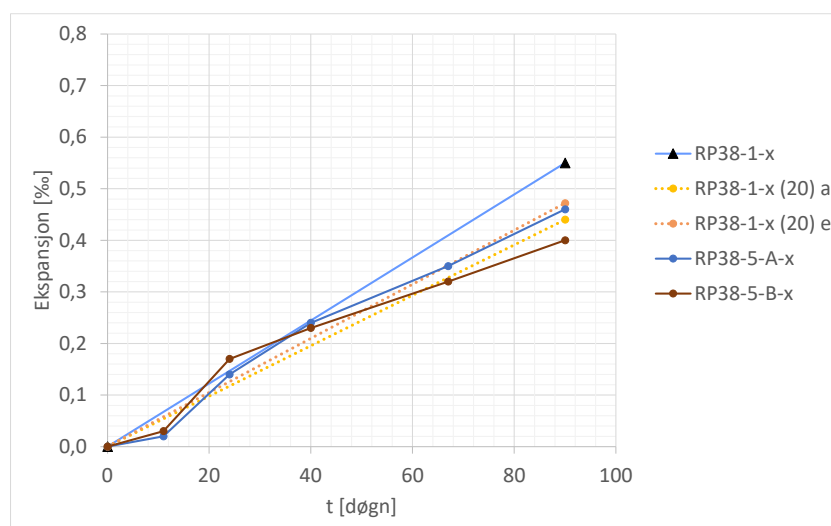
Figur A-2: Enkeltmålinger ved 20- og 38 °C for kube FC38-1 i x-retning



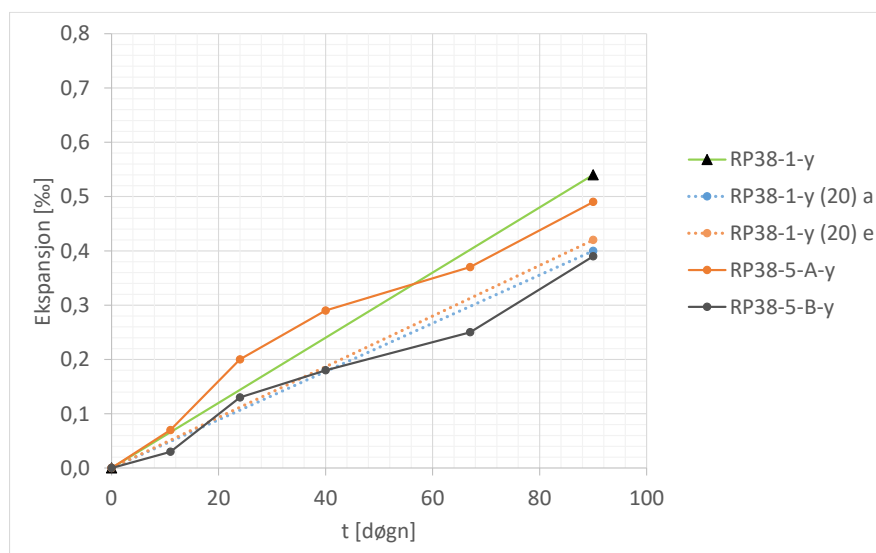
Figur A-3: Enkeltmålinger ved 20- og 38 °C for kube FC38-1 i y-retning



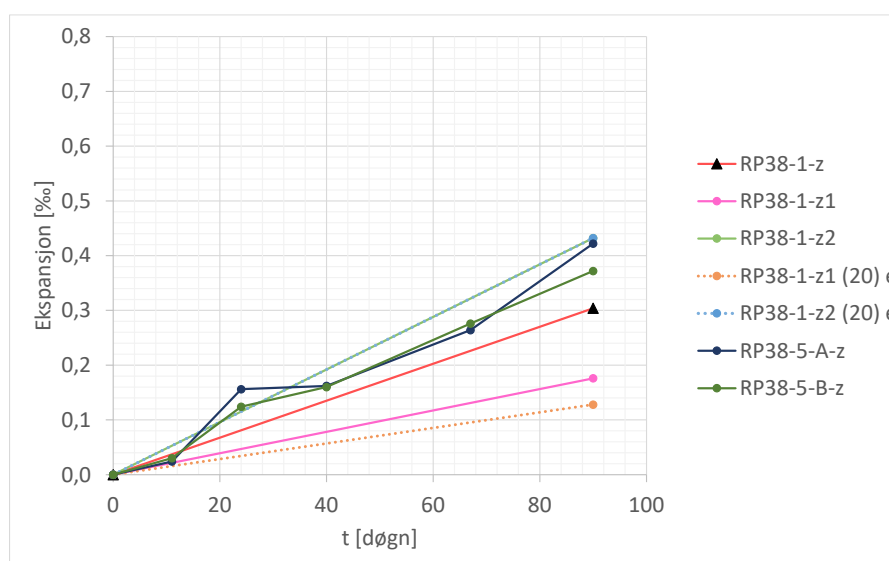
Figur A-4: Enkeltmålinger ved 20- og 38 °C for kube FC38-1 i z-retning



Figur A-5: Enkeltmålinger ved 20- og 38 °C for kube RC38-1 i x-retning



Figur A-6: Enkeltmålinger ved 20- og 38 °C for kube RC38-1 i y-retning



Figur A-7: Enkeltmålinger ved 20- og 38 °C for kube RC38-1 i z-retning

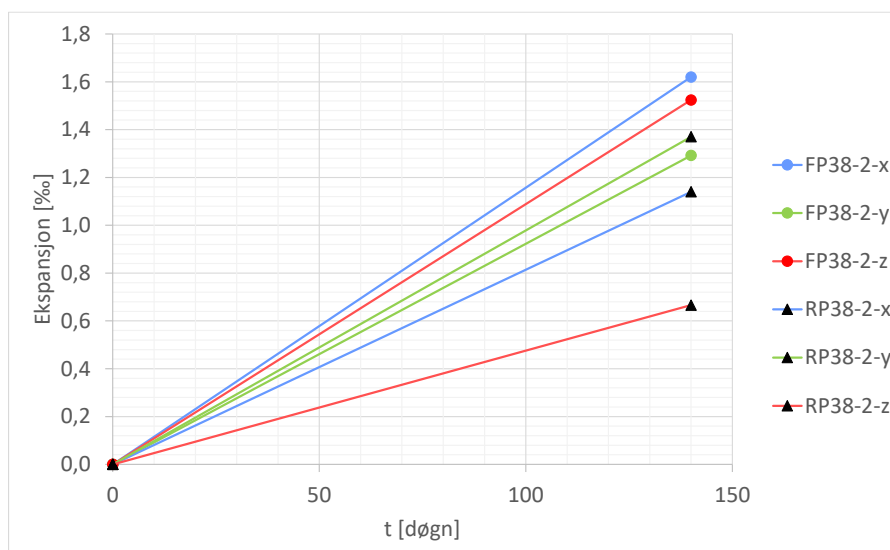
A.2: Kube FC38-2 og RC38-2

Tabell A-3: Enkeltmålinger ved 20- og 38 °C for kube FC38-2

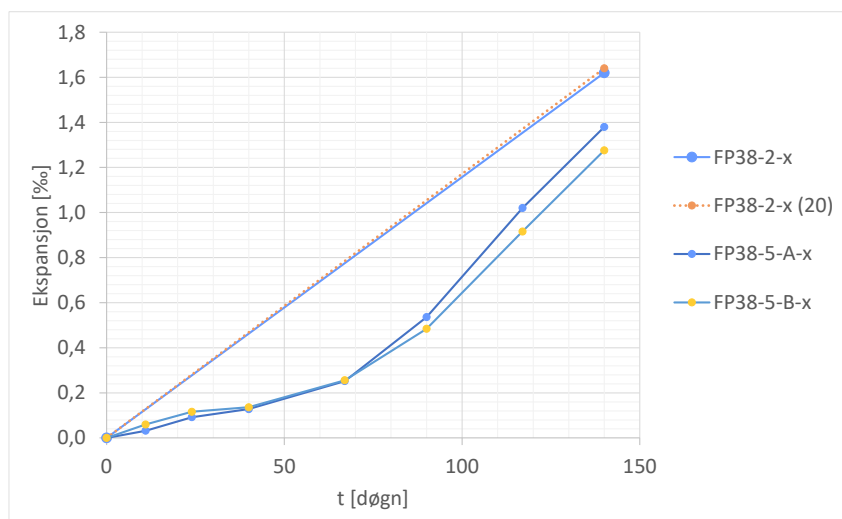
Døgn	FC38-2-	FC38-2-	FC38-2-
38 °C-målinger			
140	1,62	1,292	1,524
20 °C-målinger			
140	1,64	1,296	1,524

Tabell A-4: Enkeltmålinger ved 20- og 38 °C for kube RC38-2

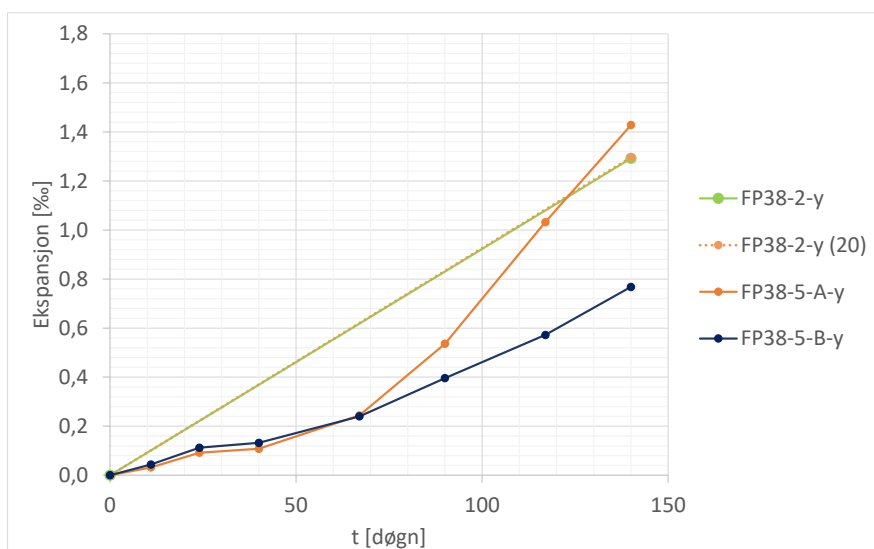
Døgn	RC38-2-	RC38-2-	RC38-2-	RC38-2-	RC38-2-
38 °C-målinger					
140	1,14	1,37	0,666	1,028	0,304
20 °C-målinger-digital					
140	1,124	1,38	0,668	1,06	0,276
20 °C-målinger-analog					
140	1,07	1,31			



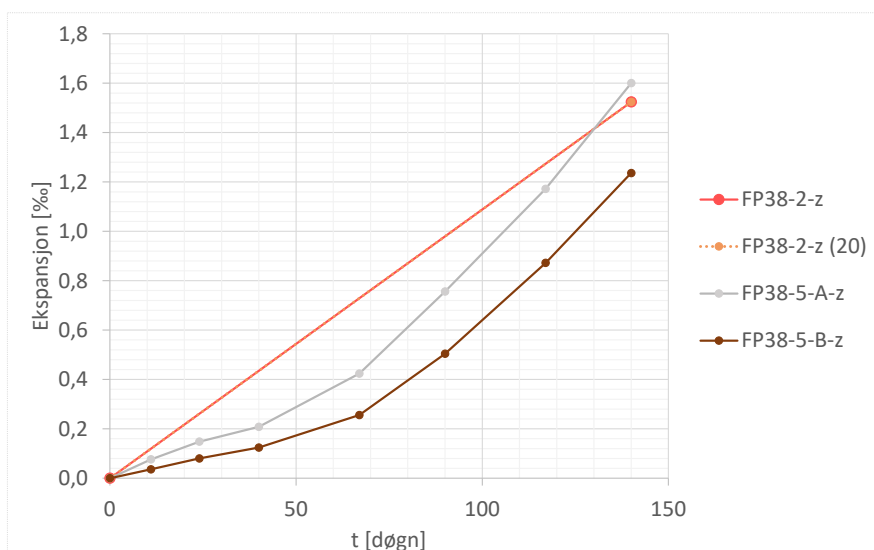
Figur A-8: Enkeltmålinger ved 38 °C for kuber FC38-2 og RC38-2



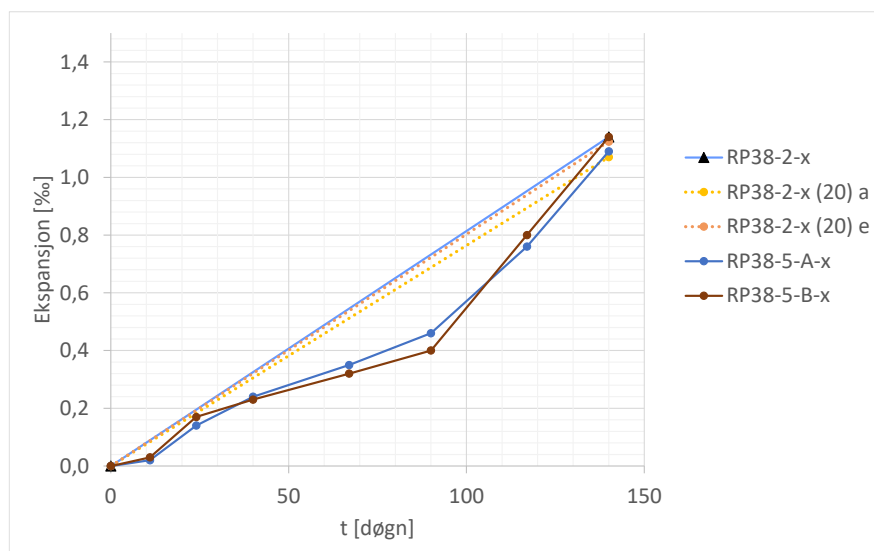
Figur A-9: Enkeltmålinger ved 20- og 38 °C for kube FC38-2 i x-retning



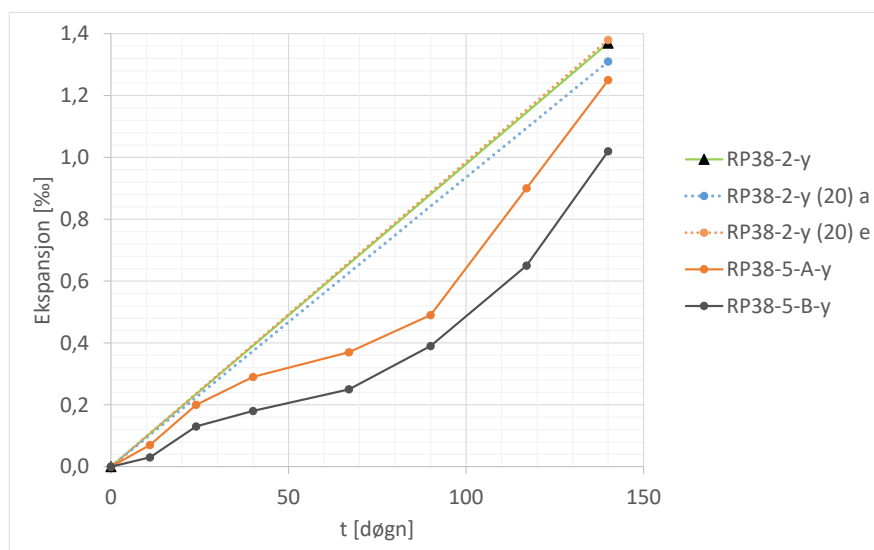
Figur A-20: Enkeltmålinger ved 20- og 38 °C for kube FC38-2 i y-retning



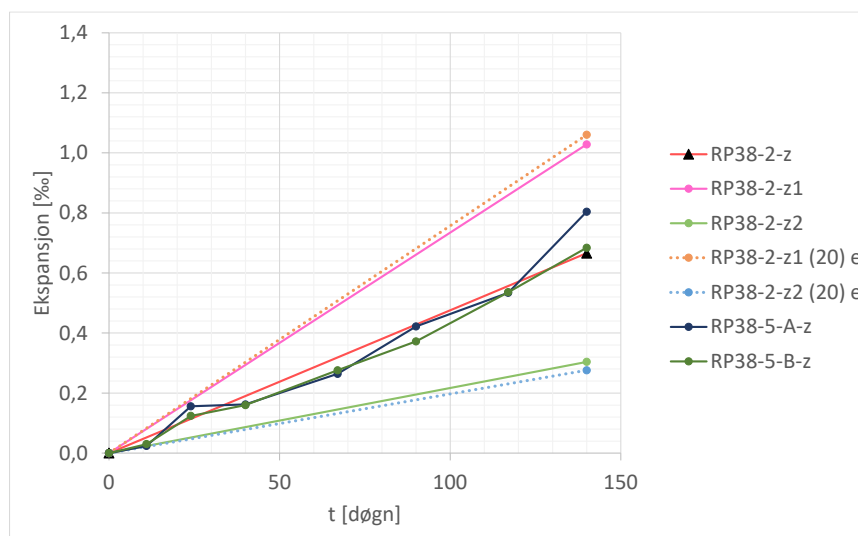
Figur A-31: Enkeltmålinger ved 20- og 38 °C for kube FC38-2 i z-retning



Figur A-42: Enkeltmålinger ved 20- og 38 °C for kube RC38-2 i x-retning



Figur A-53: Enkeltmålinger ved 20- og 38 °C for kube RC38-2 i y-retning



Figur A-64: Enkeltmålinger ved 20- og 38 °C for kube RC38-2 i z-retning

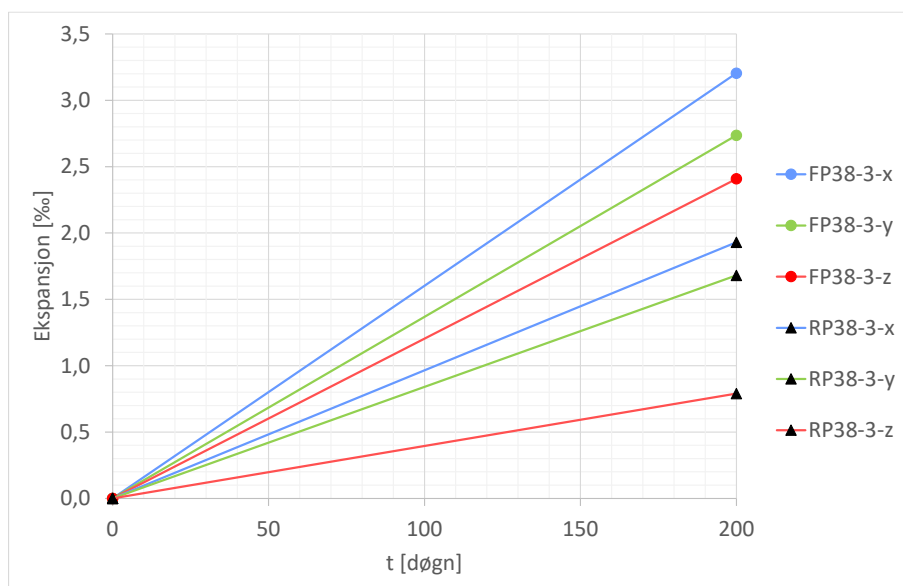
A.3: Kube FC38-3 og RC38-3

Tabell A-5: Enkeltmålinger ved 20- og 38 °C for kube FC38-3

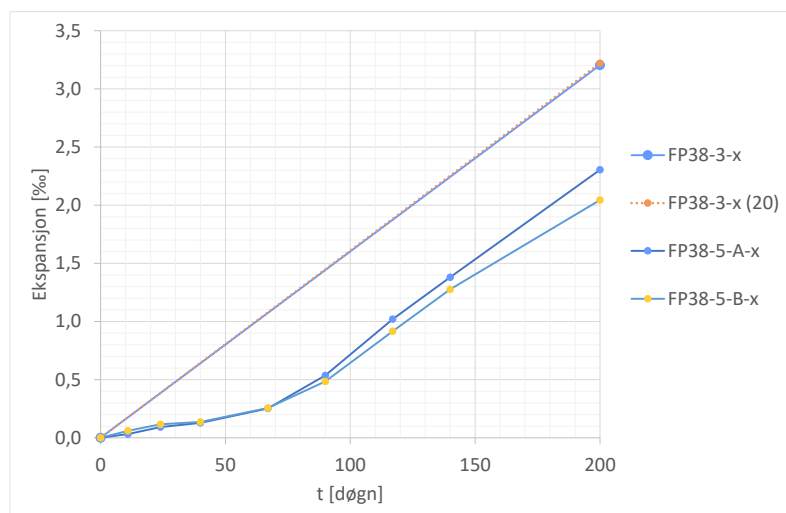
Døgn	FC38-3-	FC38-3-	FC38-3-
38 °C-målinger			
200	3,204	2,736	2,408
20 °C-målinger			
200	3,220	2,672	2,392

Tabell A-6: Enkeltmålinger ved 20- og 38°C for kube RC38-3

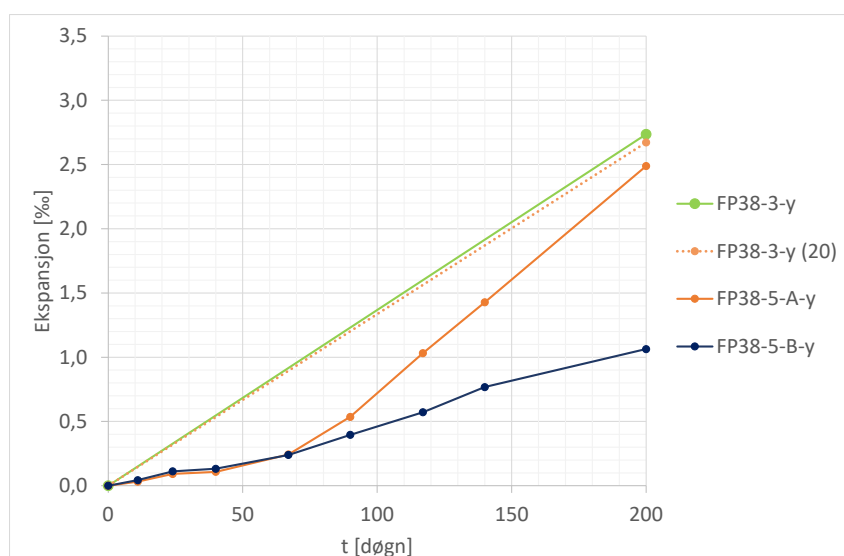
Døgn	RC38-3-	RC38-3-	RC38-3-	RC38-3-	RC38-3-
38 °C-målinger					
200	1,930	1,680	0,79	0,764	0,816
20 °C-målinger-digital					
200	1,920	1,808	0,684	0,704	0,664
20 °C-målinger-analog					
200	1,900	1,680			



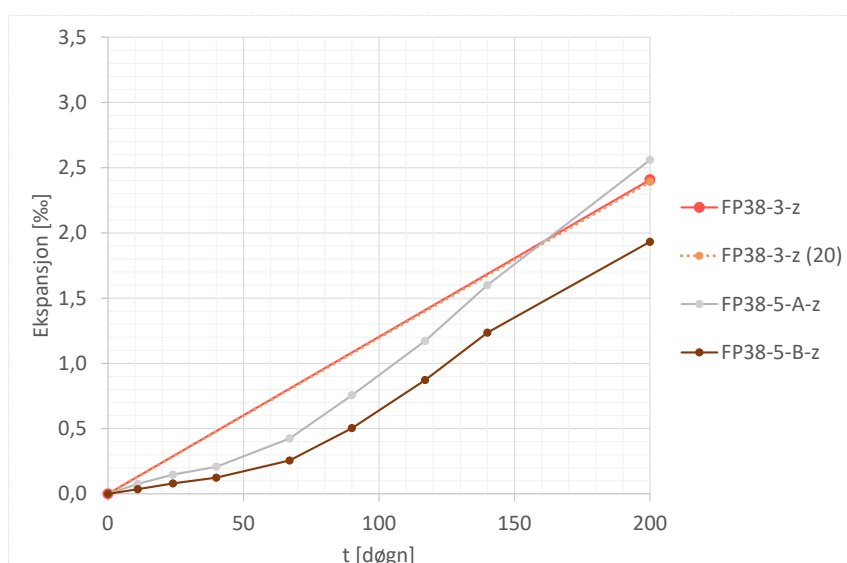
Figur A-15: Enkeltmålinger ved 38 °C for kuber FC38-3 og RC38-3



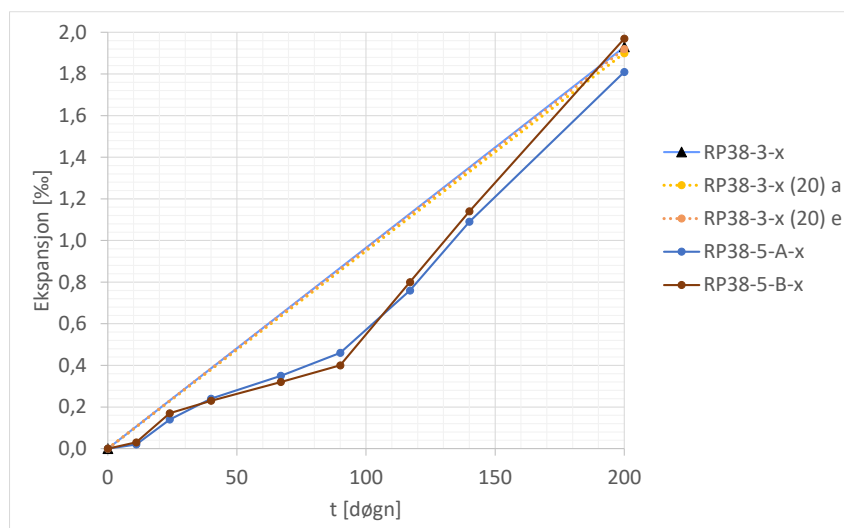
Figur A-76: Enkeltmålinger ved 20- og 38 °C for kube FC38-3 i x-retning



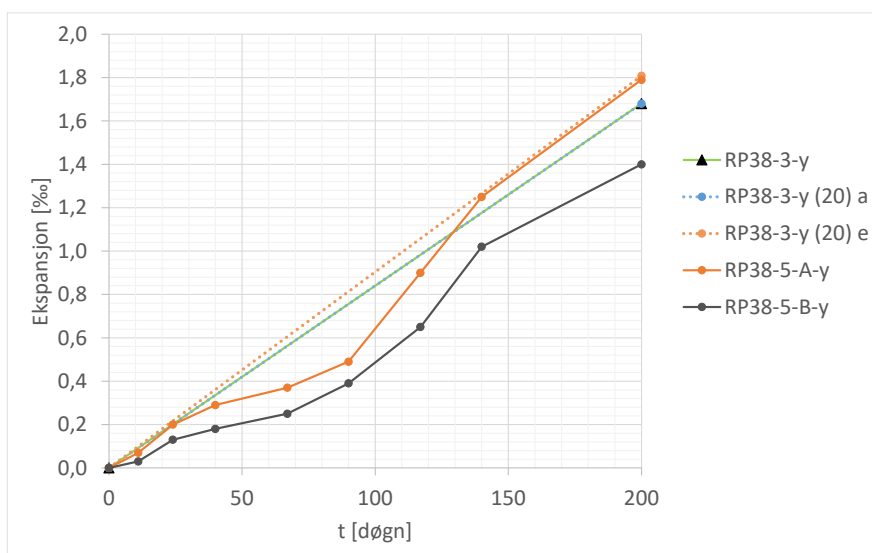
Figur A-87: Enkeltmålinger ved 20- og 38 °C for kube FC38-3 i y-retning



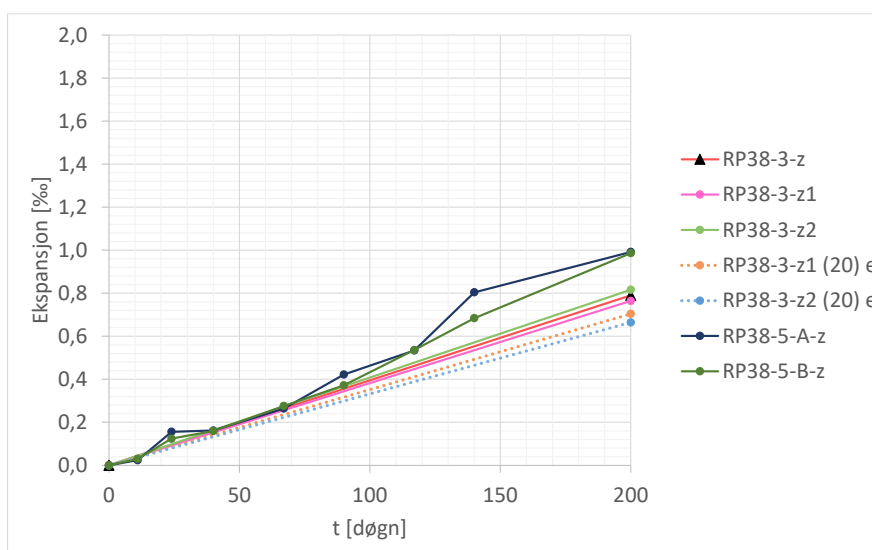
Figur A-98: Enkeltmålinger ved 20- og 38 °C for kube FC38-3 i z-retning



Figur A-1910: Enkeltmålinger ved 20- og 38 °C for kube RC38-3 i x-retning



Figur A-110: Enkeltmålinger ved 20- og 38 °C for kube RC38-3 i y-retning



Figur A-121: Enkeltmålinger ved 20- og 38 °C for kube RC38-3 i z-retning

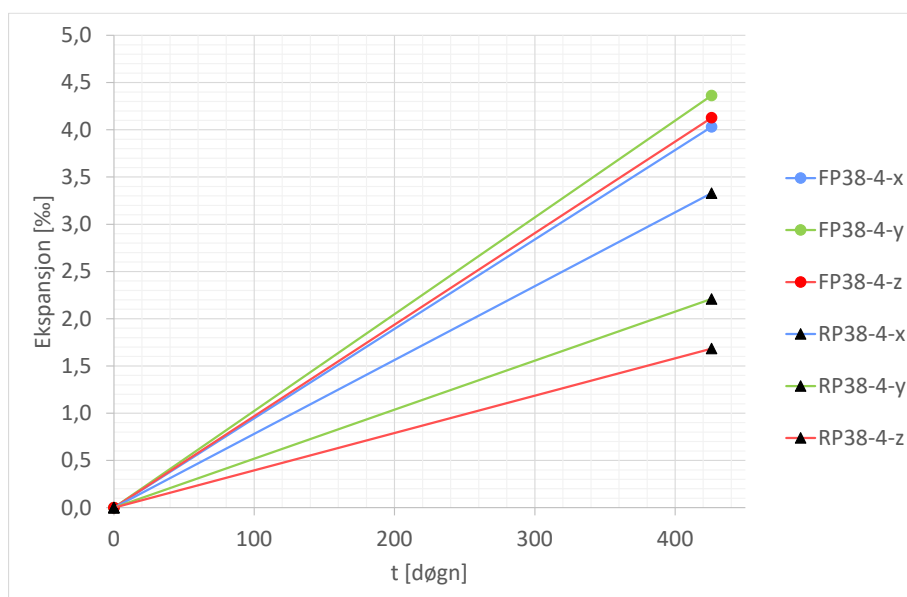
A.4: Kube FC38-4 og RC38-4

Tabell A-7: Enkeltmålinger ved 20- og 38°C for kube FC38-4

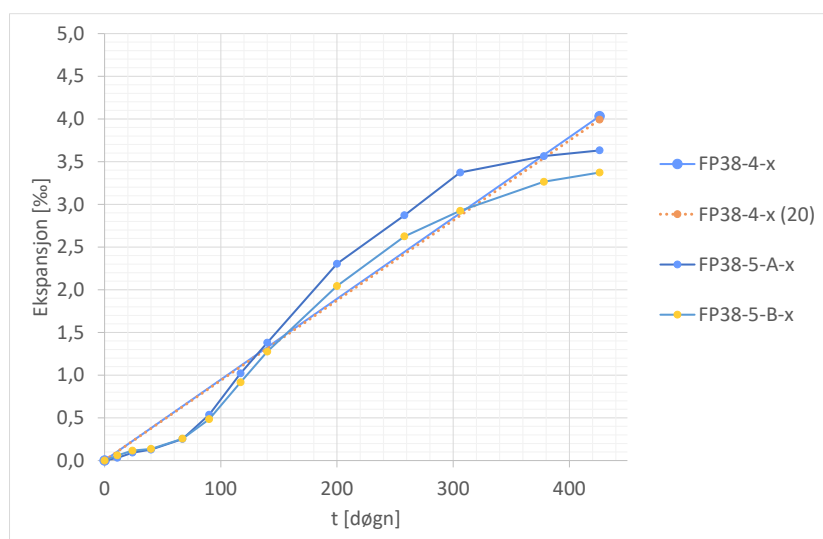
Døgn	FC38-4-	FC38-4-y	FC38-4-
38 °C-målinger			
426	4,032	4,364	4,128
20 °C-målinger			
426	3,992	4,328	4,112

Tabell A-8: Enkeltmålinger ved 20- og 38 °C for kube RC38-4

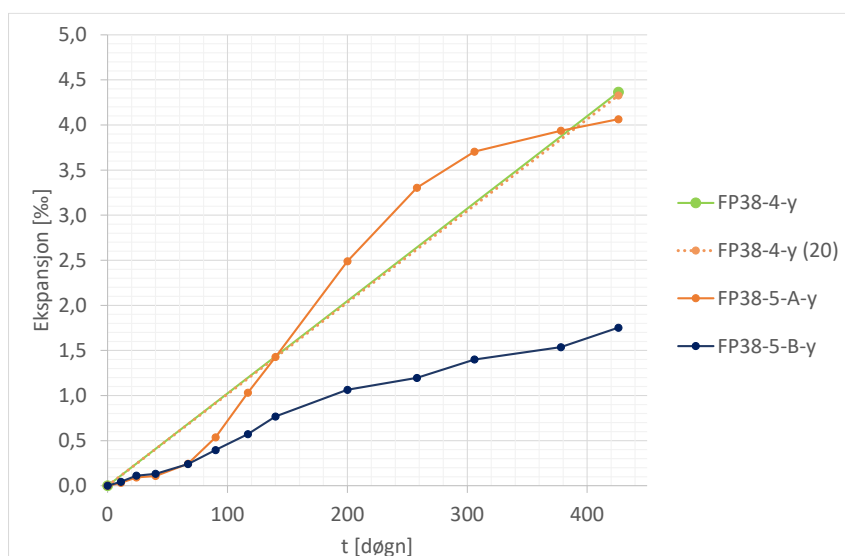
Døgn	RC38-4- x	RC38-4- y	RC38-4- z	RC38-4- z1	RC38-4- z2
38 °C-målinger					
426	3,330	2,210	1,684	1,576	1,792
20 °C-målinger-digital					
426	3,352	2,252	1,714	1,592	1,836
20 °C-målinger-analog					
426	3,270	2,180			



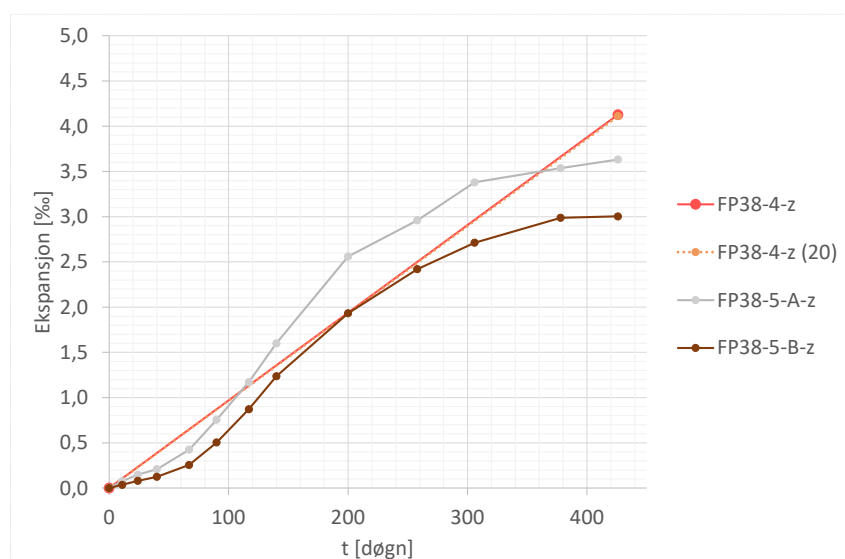
Figur A-132: Enkeltmålinger ved 38 °C for kuber FC38-4 og RC38-4



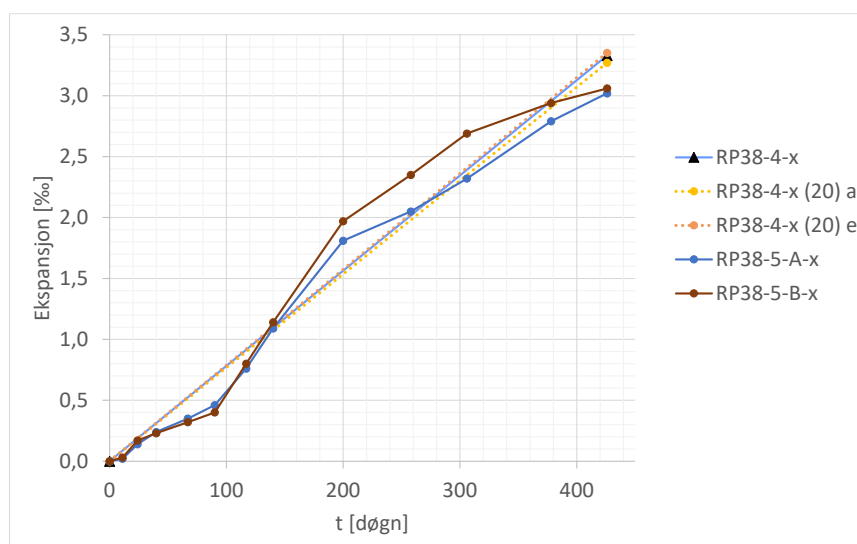
Figur A-143: Enkeltmålinger ved 20- og 38 °C for kube FC38-4 i x-retning



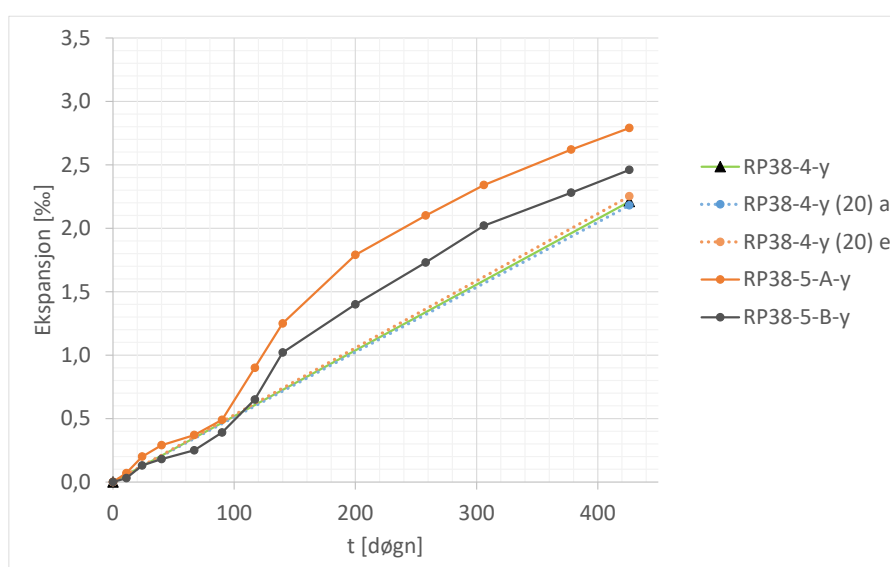
Figur A-154: Enkeltmålinger ved 20- og 38 °C for kube FC38-3 i y-retning



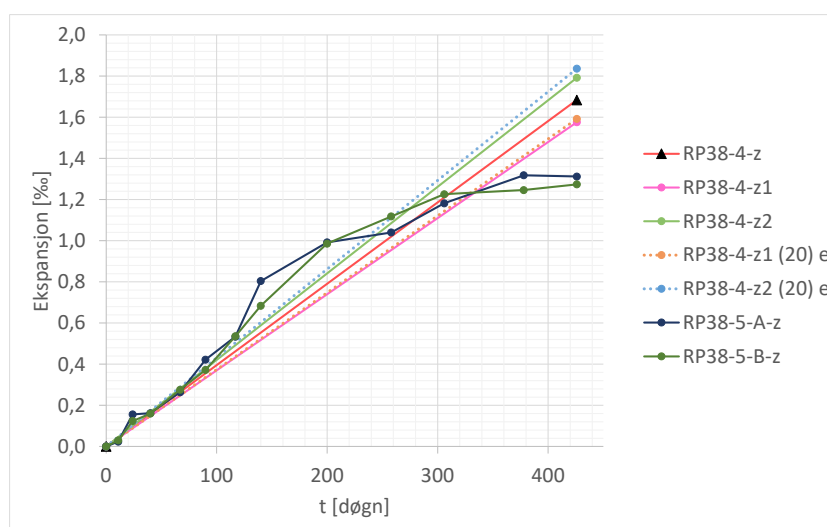
Figur A-165: Enkeltmålinger ved 20- og 38 °C for kube FC38-3 i z-retning



Figur A-176: Enkeltmålinger ved 20- og 38 °C for kube RC38-3 i x-retning



Figur A-187: Enkeltmålinger ved 20- og 38 °C for kube RC38-3 i y-retning



Figur A-198: Enkeltmålinger ved 20- og 38 °C for kube RC38-3 i z-retning

A.5: Regelmessig målte kuber, FC38-5 og RC38-5.

Verdiene i tabellene er tøyingsverdier ved forskjellige tidspunkt for disse prøvene regnet i forhold til referansen som er verdien rett etter at de er blitt varmet opp til 38 °C. Hvis et målepunkt faller av, blir det limt på et nytt og det tas ny referanse og den videre tøyingsutviklingen legges til den som har vært.

20 °C målingene er her tilleggsekspansjonen til kubene under lagringen ved 20 °C etter at de ble tatt ut fra 38 °C- rommet. Siden det er den videre utviklingen av ekspansjonen en er ute etter ved 20 °C, så betyr det egentlig ikke noe hva en benytter som referanse. Det betyr imidlertid noe for absoluttverdien til tøyningen. Det beste er da antakelig bare å forholde seg til de løpende målingene siden tøyningen fra endringen i temperatur kan antas å være noe forskjellig for en homogen og en risset prøve. For den belastede prøven har en heller ikke noe annet valg, siden varige tøyninger fra belastningen gjør at en mister den direkte relasjonen til de innledende målingene ved 20 °C.

Tabell A-9: Middel- og enkeltverdier ved 38- og 20 °C for kube FC38-5, tøyninger i %.

Døgn	FC38-5-x	FC38-5-A-x	FC38-5-B-x	FC38-5-v	FC38-5-A-v	FC38-5-B-v	FC38-5-z	FC38-5-A-z	FC38-5-B-z
38 °C-målinger									
11	0,046	0,032	0,060	0,038	0,032	0,044	0,056	0,032	0,036
24	0,104	0,092	0,116	0,102	0,092	0,112	0,114	0,092	0,080
40	0,132	0,128	0,136	0,120	0,108	0,132	0,166	0,108	0,124
67	0,254	0,252	0,256	0,242	0,244	0,240	0,340	0,244	0,256
90	0,510	0,536	0,484	0,466	0,536	0,396	0,630	0,536	0,504
117	0,968	1,020	0,916	0,802	1,032	0,572	1,022	1,032	0,872
140	1,328	1,380	1,276	1,098	1,428	0,768	1,418	1,428	1,236
200	2,174	2,304	2,044	1,776	2,488	1,064	2,246	2,488	1,932
258	2,748	2,872	2,624	2,250	3,304	1,196	2,690	3,304	2,420
306	3,148	3,372	2,924	2,552	3,704	1,400	3,046	3,704	2,712
378	3,414	3,564	3,264	2,736	3,936	1,536	3,262	3,936	2,988
426	3,502	3,632	3,372	2,908	4,064	1,752	3,318	4,064	3,004
564	4,046	4,320	3,772	3,088	4,116	2,060	3,722	4,116	3,164
594	4,142	4,268	4,016	3,096	4,092	2,100	3,712	4,244	3,180
20 °C-målinger									
602	4,178	4,304	4,052	3,116	4,116	2,116	3,732	4,268	3,196
630	4,202	4,332	4,072	3,142	4,148	2,136	3,76	4,296	3,224
791	4,310	4,464	4,156	3,182	4,204	2,160	3,836	4,396	3,276

Tabell A-10: Enkeltmålinger ved 20- og 38 °C og elastisk deformasjon for kube RC38-5 i x og y-retning.

Døgn	RC38-5- x	RC38-5-A- x	RC38-5-B- x	RC38-5- y	RC38-5-A- y	RC38-5-B- y
38 °C-målinger (m.last) – analog						
11	0,025	0,020	0,030	0,050	0,070	0,030
24	0,155	0,140	0,170	0,165	0,200	0,130
40	0,235	0,240	0,230	0,235	0,290	0,180
67	0,335	0,350	0,320	0,310	0,370	0,250
90	0,430	0,460	0,400	0,490	0,490	0,390
117	0,780	0,760	0,800	0,775	0,900	0,650
140	1,115	1,090	1,140	1,135	1,250	1,020
200	1,890	1,810	1,970	1,595	1,790	1,400
258	2,200	2,050	2,350	1,915	2,100	1,730
306	2,505	2,320	2,690	2,180	2,340	2,020
378	2,865	2,790	2,940	2,450	2,620	2,280
426	3,040	3,020	3,060	2,625	2,790	2,460
571	3,615	3,770	3,460	3,230	3,430	3,030
594	3,705	3,770	3,640	3,255	3,410	3,100
20 °C-målinger (u.last) – digitalt						
604	3,809	3,882	3,736	3,305	3,486	3,124
632	3,853	3,914	3,792	3,335	3,518	3,152
793	4,085	4,202	3,968	3,455	3,706	3,204

Tabell A-11: Enkeltmålinger ved 20- og 38 °C og elastisk deformasjon for kube RC38-5 i z-retning, tøyninger i %.

Døgn	RC38- 5-z	RC38- 5-A-z	RC38- 5-A-z1	RC38- 5-A-z2	RC38- 5-B-z	RC38- 5-B-z1	RC38- 5-B-z2
38 °C-målinger (m.last) – analog							
11	0,027	0,024	0,008	0,040	0,030	0,012	0,048
24	0,140	0,156	0,124	0,188	0,124	0,096	0,152
40	0,161	0,162	0,156	0,168	0,160	0,124	0,196
67	0,270	0,264	0,236	0,292	0,276	0,272	0,280
90	0,397	0,422	0,384	0,460	0,372	0,316	0,428
117	0,535	0,534	0,548	0,520	0,536	0,468	0,604
140	0,744	0,804	0,744	0,864	0,684	0,608	0,760
200	0,989	0,992	0,944	1,040	0,986	0,912	1,060
258	1,079	1,040	1,028	1,052	1,118	1,060	1,176
306	1,204	1,182	1,104	1,260	1,226	1,144	1,308
378	1,282	1,318	1,188	1,448	1,246	1,152	1,340
426	1,293	1,312	1,192	1,432	1,274	1,176	1,372
571	1,378	1,384	1,256	1,512	1,372	1,256	1,488
594	1,334	1,348	1,212	1,484	1,320	1,224	1,416
20 °C-målinger (u.last)							
604	1,361	1,374	1,256	1,492	1,348	1,252	1,444
632	1,38	1,390	1,268	1,512	1,370	1,264	1,476
793	1,397	1,424	1,312	1,536	1,370	1,264	1,476

Hvis en sammenligner disse kubene litt, så har RC38-5 størst ekspansjon i x og y-retningen i starten (opp til ca. 90 døgn) før den blir størst i disse retningene i FC38-5. Etter 594 døgn er den gjennomsnittlige ekspansjonen til den frie prøven i x, y og z-retningen 3,65 ‰, mens den gjennomsnittlige ekspansjonen i x og y-retningen til den belastede prøven er 3,48 ‰. Noe som betyr at ekspansjonen i de frie retningene til disse prøvene er ganske like.

Etter at RC38-5 er blitt avlastet lagres disse prøvene videre i de samme fuktige bøttene i 197 døgn ved 20 °C. Dette ble gjort primært for å undersøke effekten av avlastingen på ekspansjonen i lastretningen til den belastede prøven. Ekspansjonen fortsetter da å øke med 0,168 ‰ i x-retningen, 0,086 ‰ i y-retningen og 0,124 ‰ i z-retningen til FC38-5 og med 0,380 ‰, 0,200 ‰ og 0,056 ‰ i de samme retningene for RC38-5. Hvis vi da tar gjennomsnittet for alle retningene for FC38-5 og for x og y-retningen for RC38-5, så blir de henholdsvis 0,126 ‰ og 0,295 ‰. Og ut fra dette har da den belastede prøven ekspandert omtrent dobbelt så mye som den frie prøven i de frie retningene etter at den ble avlastet. Mens den videre ekspansjonen i den belastede retningen til RC38-5 er forholdsvis liten, bare ca. 20 % av i de frie retningene.

Dette viser at den belastede prøven har utviklet en overvekt av riss i lastretningen og at den videre ekspansjonen i løpet av denne tiden hovedsakelig skjer i disse rissene.

Hvis en legger sammen tøyningene i de tre retningene for de to prøvene, så gir det 0,406 ‰ for FC38-5 og 0,645 ‰ for RC38-5. Dette viser da at det heller ikke er noen sammenheng mellom volumtøyningene til tilleggsekspansjonen i de to tilfellene. Dette er heller ikke forventet hvis ekspansjonen i hovedsak foregår i noen diskrete riss.

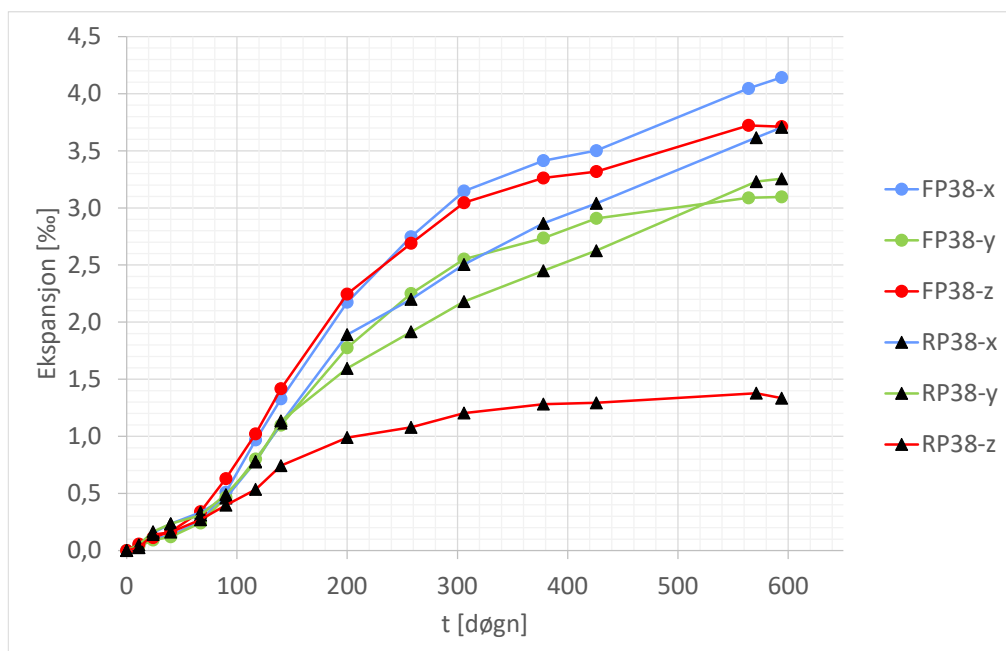
Dette forløpet for den avlastede prøven er likevel ikke forventet å være generelt gyldig. En må forvente at disse verdiene vil forandre seg med tiden og at den belastede retningen etter hvert vil øke og nærme seg de andre retningene hvis reaksjonen fortsetter. Hvordan en slik avlasting er forventet å fungere over tid, må derfor vurderes i hvert enkelt tilfelle.

Utviklingen av de avleste trykkreftene i lastcellen for de ulike kubene er vist i Tabell A-12 (24/01/19-03/02/20). Kube RC38-5 ble avlastet den 05/02/19 (etter lagring i ca. 1 uke) på grunn av instrumentering av strekkklapper, i den forbindelse ble alle belastede kuber justert noe for å få en mest mulig lik last. Ser at lasten har holdt seg ganske konstant gjennom hele lagringsperioden. En forskjell i kraft på 10 kN utgjør en elastisk tøyning på 0,0074 ‰ om man bruker en E-modul lik 28000 MPa. ΔF er forskjellen mellom ny pålasting (05/02/19) og last ved siste avlesning (03/02/20). Ser at forskjellen i kraft betyr lite for trykkspenningen og den tilhørende tøyningen dette gir.

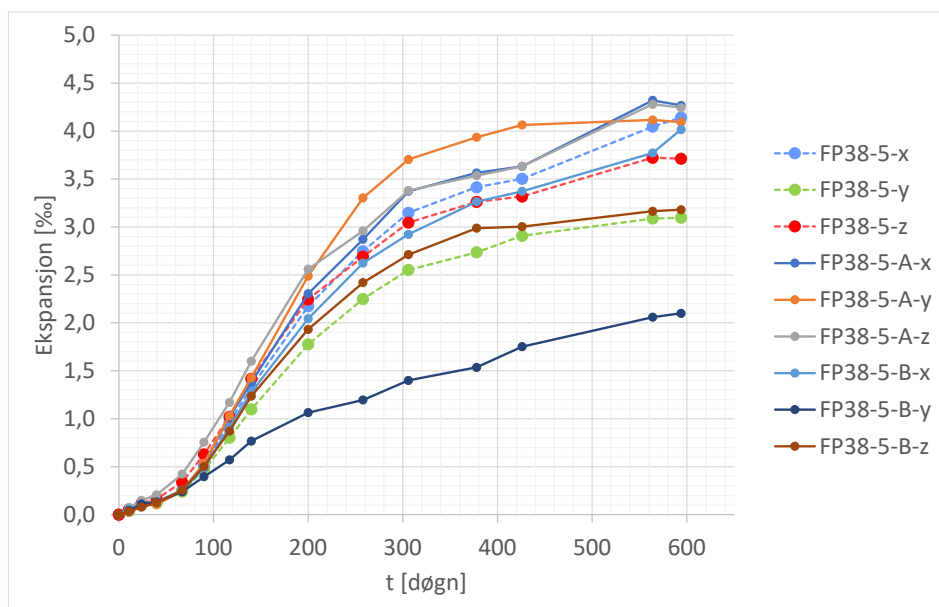
Tabell A-12: Utvikling av kraft avlest av lastcelle

	24/01	05/02	05/02	14/06	19/06	26/11	03/02	ΔF	$\Delta \sigma$	$\Delta \epsilon$ [‰]
RC38-3	15,14	146,7	158,5	152,9	153,6	155,4	155,4	-3,1	-0,0590	-0,0021
RC38-5	14,02	156,4	154,3	151,7	151,8	158,3	158,3	3,9	0,0743	0,0027
RC38-4	14,06	146,4	155,3	156,1	156,4	161,0	161,0	5,7	0,1081	0,0039

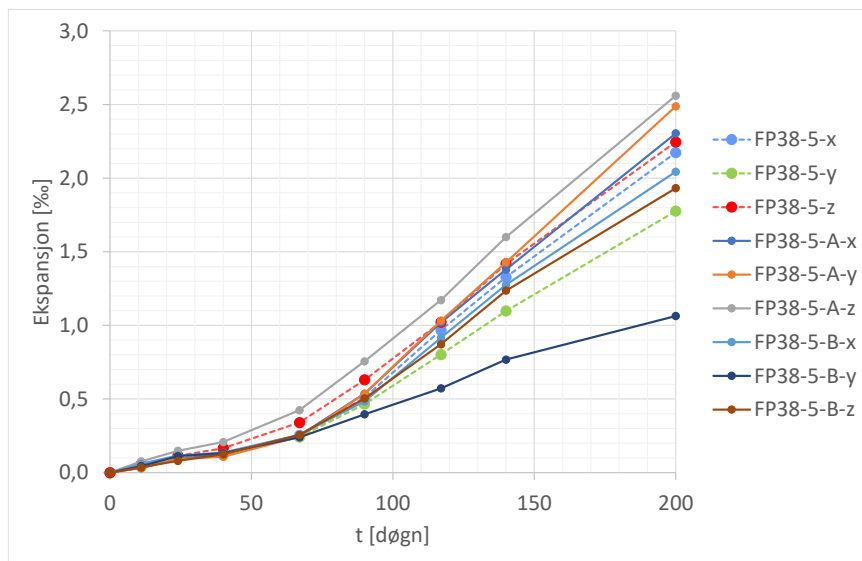
RC38-1	14,98	148,9	157,4	-	-	-	-	8,5	0,1603	0,0057
RC38-2	15,04	145,4	154,3	156,3	156,6	-	-	11,2	0,2125	0,0076



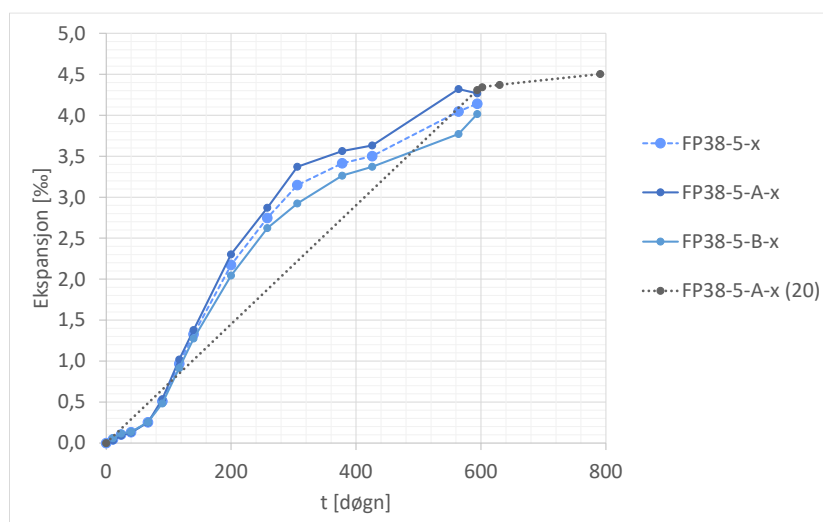
Figur A-2920: Gjennomsnittlige målinger kuber FC38-5 og RC38-5 ved 38 °C



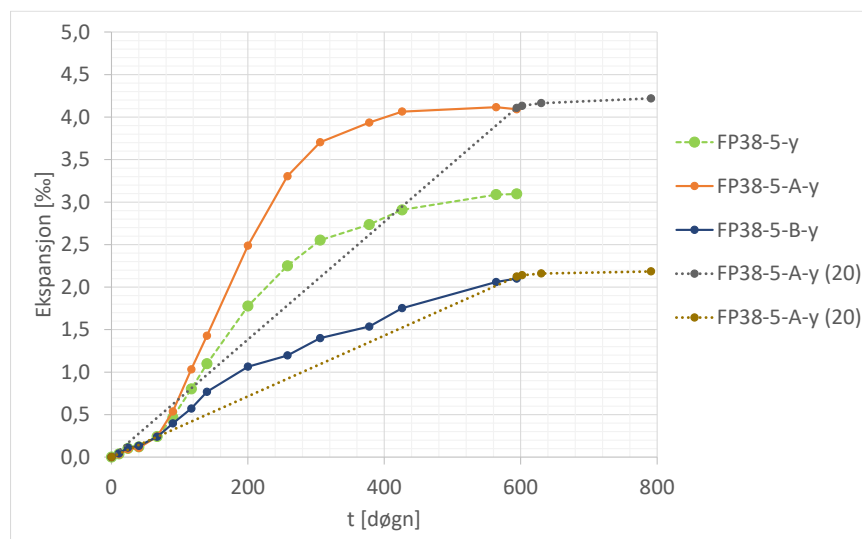
Figur A-30: Enkeltmålinger kube FC38-5 ved 38 °C



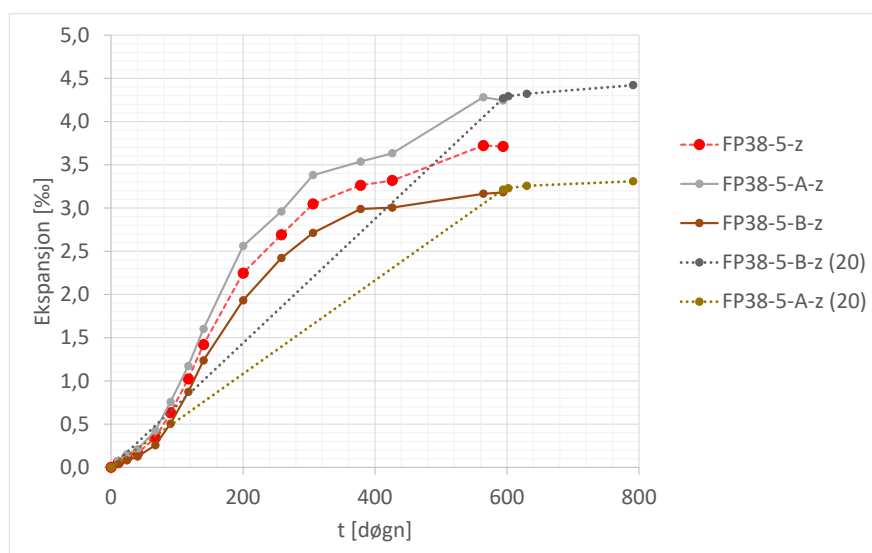
Figur A-211: Enkeltmålinger kube FC38-5 ved 38 °C til 200 døgn



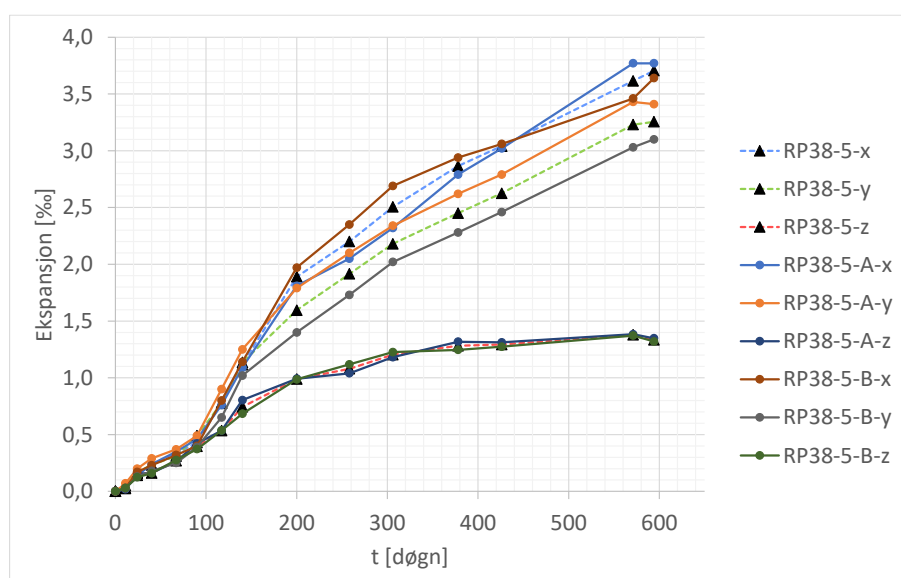
Figur A-3222: Enkeltmålinger ved 20- (fra 20°C-refereanse) og 38 °C for kube FC38-5 i x-retning



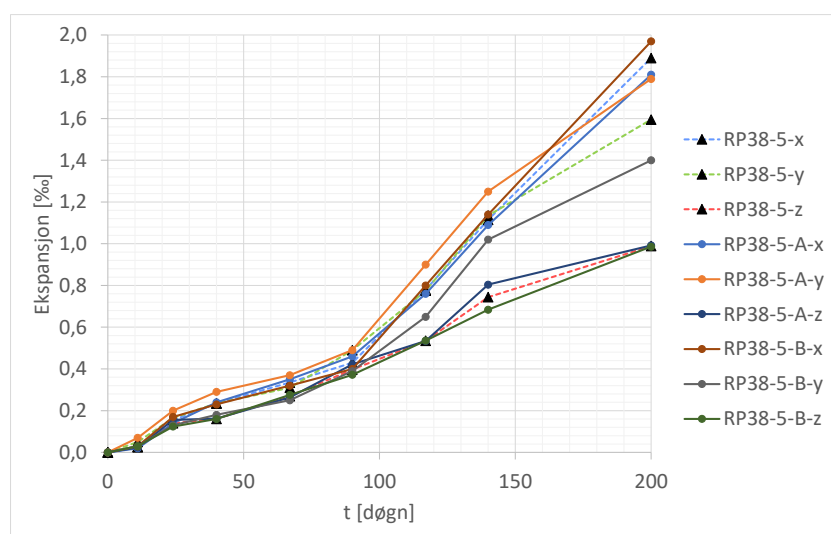
Figur A-233: Enkeltmålinger ved 20- (fra 20°C-refereanse) og 38 °C for kube FC38-5 i y-retning



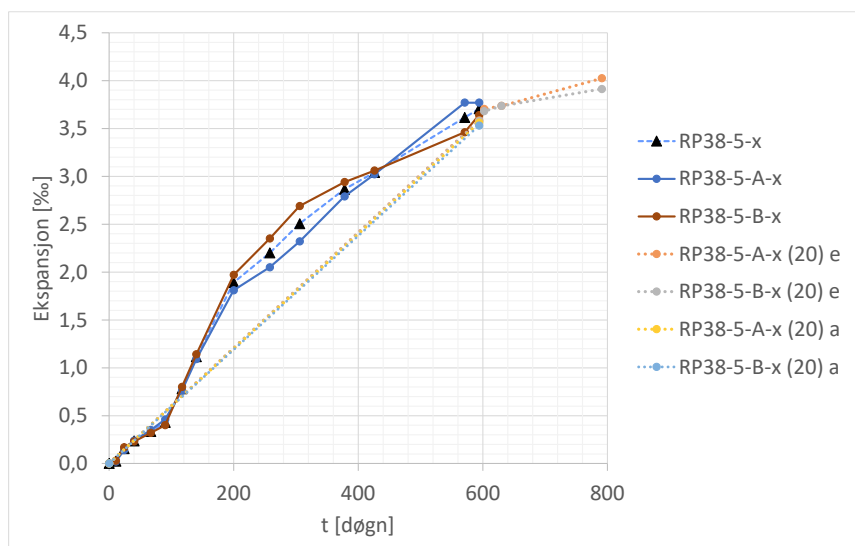
Figur A-3424: Enkeltmålinger ved 20- (fra 20°C-refereanse) og 38 °C for kube FC38-5 i z-retning



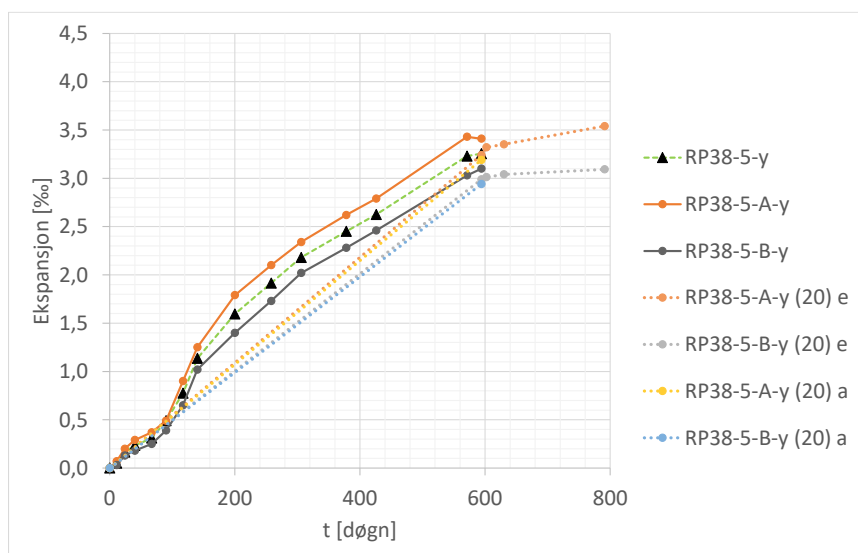
Figur A-255: Enkeltmålinger ved 38 °C for kube RC38-5



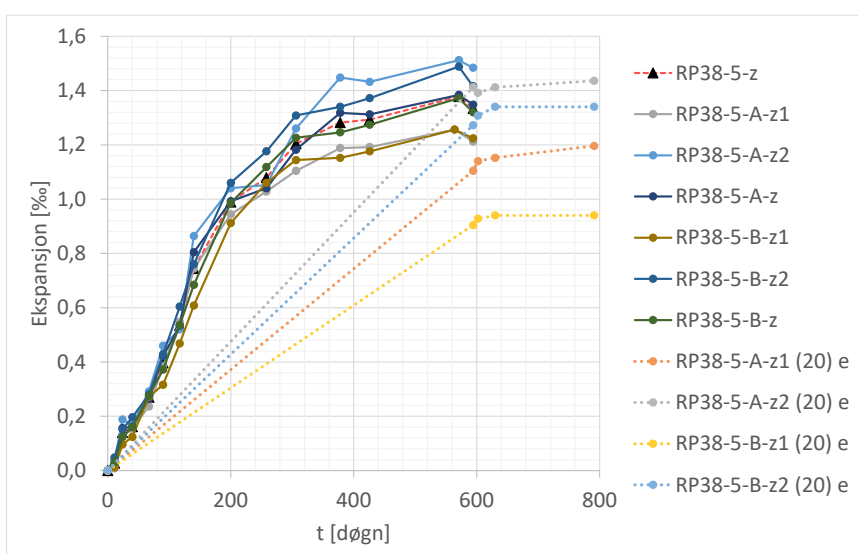
Figur A-266: Enkeltmålinger ved 38 °C for kube RC38-5 frem til 200 døgn



Figur A-3727: Enkeltmålinger ved 20- (fra 20°C-refereanse) og 38 °C for kube RC38-5 i x-retning



Figur A-3828: Enkeltmålinger ved 20- (fra 20°C-refereanse) og 38 °C for kube RC38-5 i y-retning



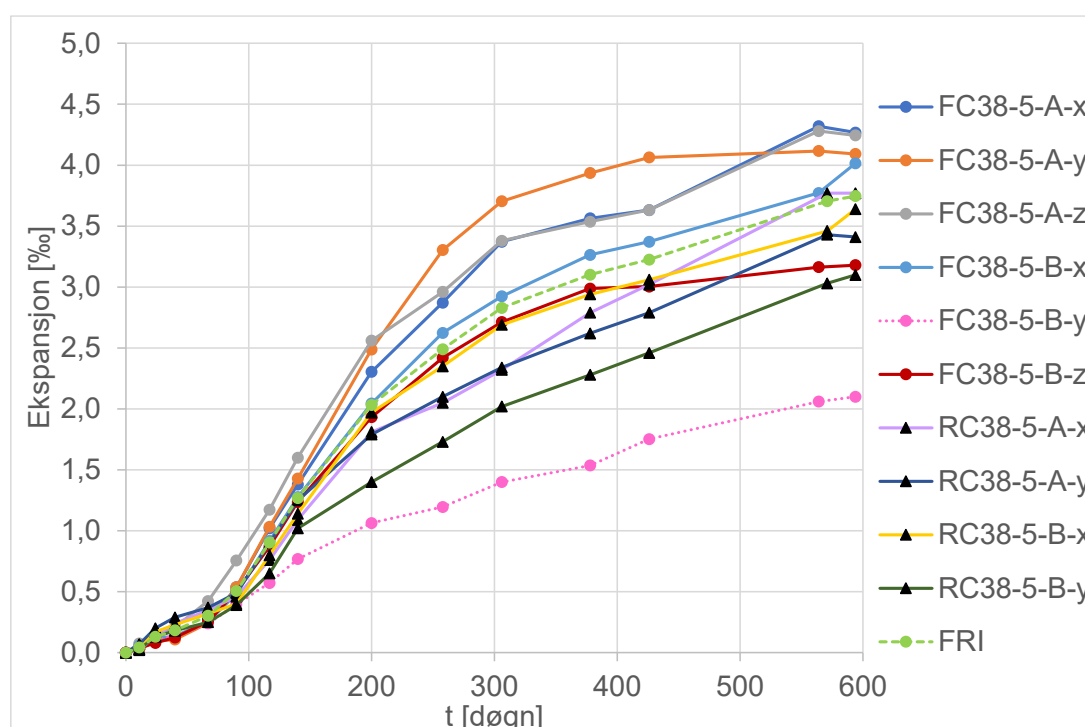
Figur A-39: Enkeltmålinger ved 20- (fra 20°C-refereanse) og 38 °C for kube RC38-5 i z-retning

A-6: Fri ekspansjon

Fri ekspansjon beregnet av alle målinger i fri retninger på belastet kube RC38-5 og FC38-5. Målinger i FC38-5-B-y som er ikke inkludert (rosa linje i Figur A-40). Middelerverdi baser på 12 målinger. Fastholdt/FRI beregnet av forholdet mellom RC38-5-z i Tabell A--11 og FRI.

Tabell A-14: Fri ekspansjon, standaravvik, variasjonskoeffisient og forhold Fastholdt/Fri ekspansjon

Døgn	FRI	Stdtddev	var. coff	Fastholdt/FRI
0	0,000	0,000	0,000	1,000
11	0,043	0,020	47,103	0,630
24	0,130	0,040	30,468	1,079
40	0,183	0,063	34,558	0,881
67	0,302	0,066	21,849	0,893
90	0,506	0,107	21,167	0,784
117	0,902	0,158	17,472	0,593
140	1,269	0,180	14,190	0,586
200	2,033	0,368	18,088	0,486
258	2,490	0,499	20,056	0,433
306	2,829	0,566	19,990	0,426
378	3,102	0,521	16,783	0,413
426	3,226	0,494	15,302	0,401
571	3,705	0,470	12,698	0,372
594	3,747	0,444	11,844	0,356



Figur A-29: Referanse fri retning for kube FC38-5 og RC38-5 markert med grønn stiple linje

VEDLEGG B: ENKELTMÅLINGER EKSPANDERTE KUBER 2020

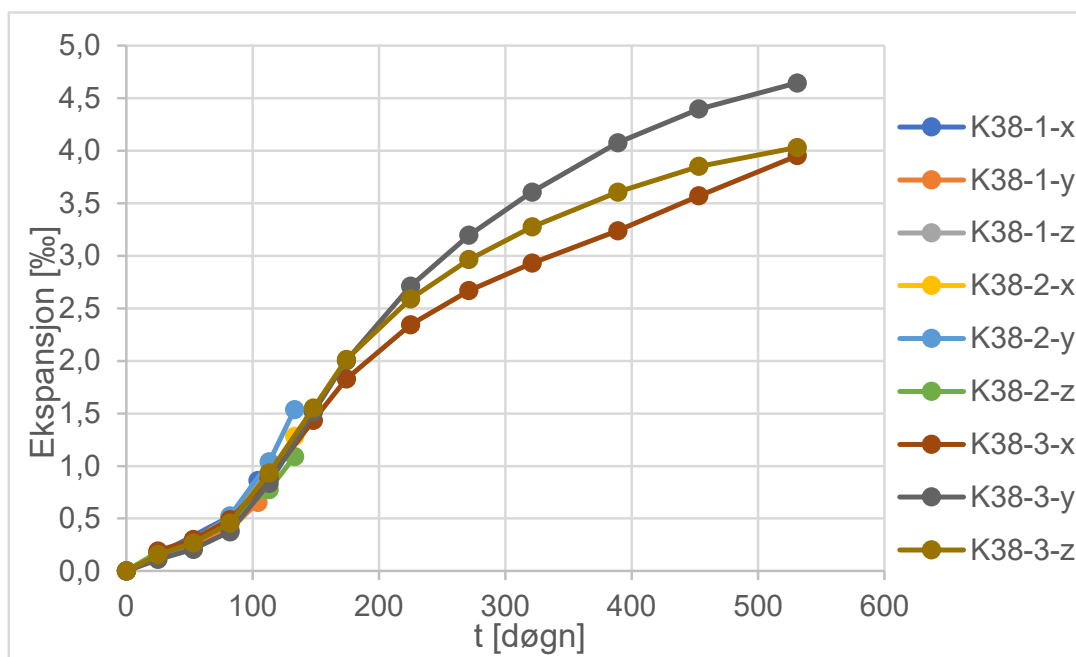
Alle målingene i tabellene er mellom like tilstander (ekspansjon regnet ut fra ulike referanser). Ved likt antall døgn skal det derfor i utgangspunktet være like ekspansjoner. Hvis målepunkt faller av, er det tatt ny referanse etter liming av nytt målepunkt. Disse punktene vil derfor kun ha 38 °C referanse. Alle tøyninger oppgitt i ‰.

B.1: Gjennomsnittlig ekspansjon frie kuber

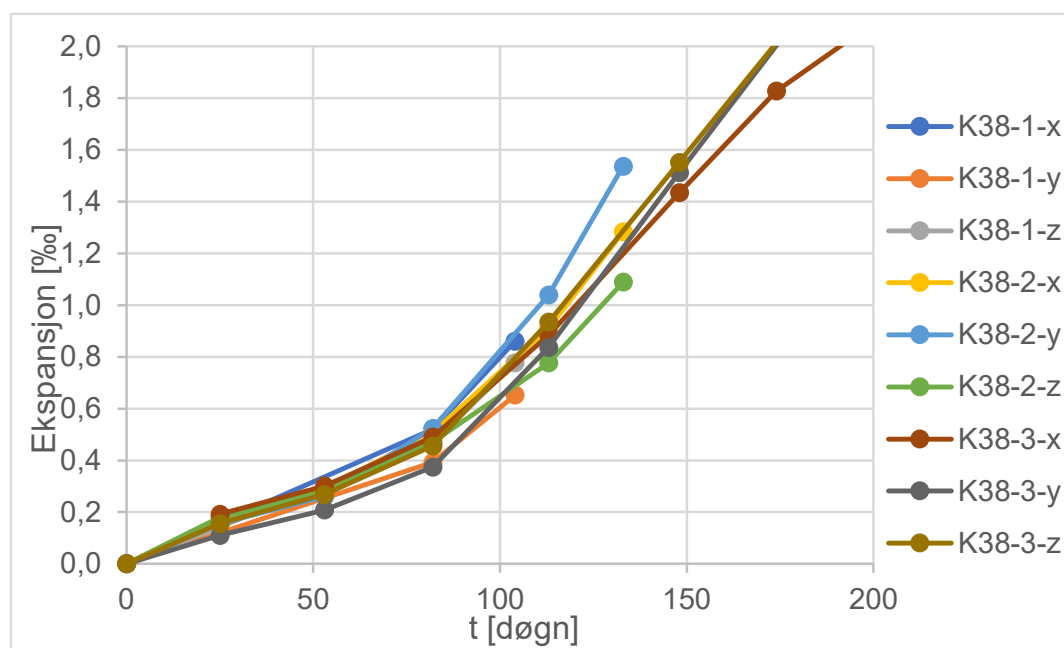
x- og y-retning gjennomsnittet av to målinger, z-retning gjennomsnittet av fire målinger.

Tabell B-4: Gjennomsnittsmålinger alle fri kuber

Prøve	Døgn lagret ved 38°C	x-retning [‰]	y-retning [‰]	z-retning [‰]	V (x+y+z) [‰]
K38-1	82	0,52	0,392	0,468	1,38
	104	0,86	0,652	0,777	2,289
K38-2	25	0,178	0,156	0,181	0,515
	53	0,290	0,260	0,279	0,829
	82	0,508	0,524	0,471	1,503
	113	0,910	1,038	0,776	2,724
	133	1,282	1,536	1,088	3,906
K38-3	25	0,192	0,110	0,156	0,458
	53	0,300	0,208	0,268	0,776
	82	0,49	0,374	0,456	1,320
	113	0,884	0,836	0,934	2,654
	148	1,434	1,512	1,551	4,497
	174	1,826	2,002	2,012	5,840
	225	2,344	2,712	2,591	7,647
	271	2,668	3,194	2,964	8,826
	321	2,93	3,606	3,274	9,810
	389	3,238	4,076	3,606	10,920
	453	3,57	4,396	3,849	11,815
	531	3,952	4,644	4,03	12,626



Figur B-1: Gjennomsnittlig ekspansjon frie kuber, K38-1, K38-2, K38-3

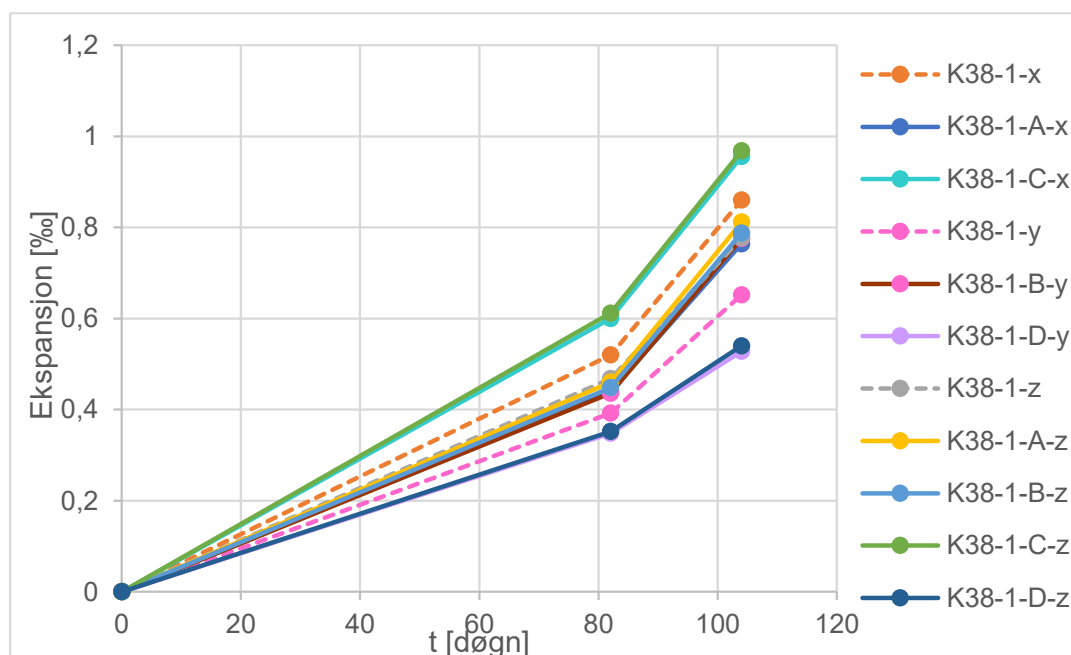


Figur B-2: Gjennomsnittlig ekspansjon frie kuber, K38-1, K38-2, K38-3 etter 200 døgn

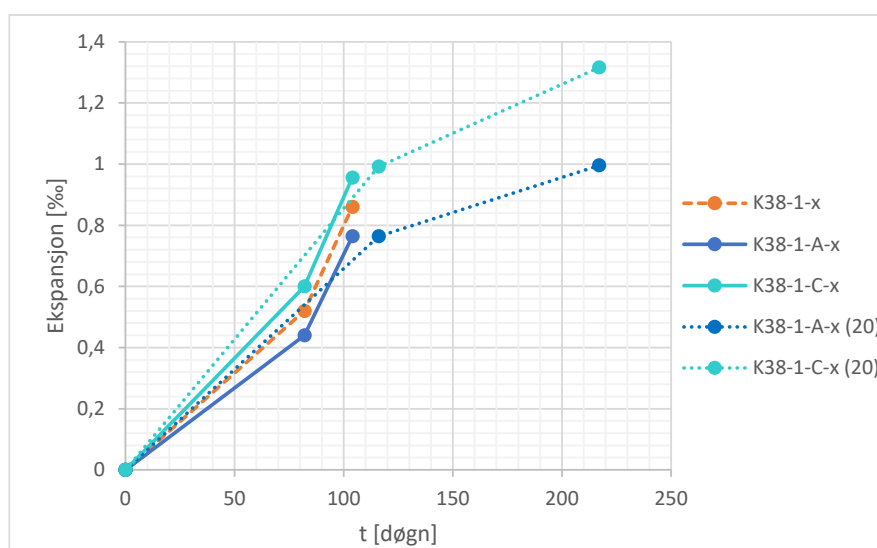
B.2: Kube K38-1

Tabell B-5: Ekspansjoner enkeltmålinger kube K38-1, fra 38- og 20 °C referanser

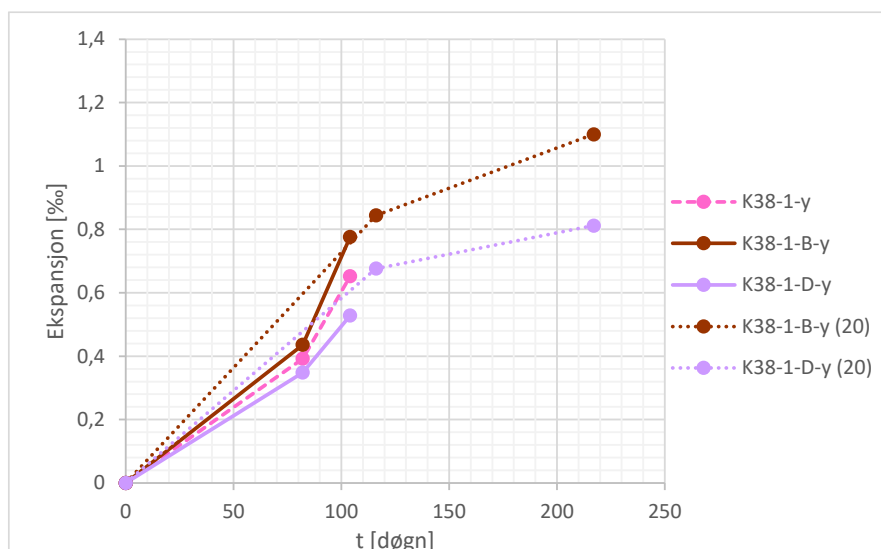
Døgn	K38-1-x	K38-1-A-x	K38-1-C-x	K38-1-y	K38-1-B-y	K38-1-D-y	K38-1-z	K38-1-A-z	K38-1-B-z	K38-1-C-z	K38-1-D-z
38°C-målinger											
82	0,520	0,440	0,600	0,392	0,436	0,348	0,468	0,460	0,448	0,612	0,352
104	0,860	0,764	0,956	0,652	0,776	0,528	0,777	0,812	0,788	0,968	0,540
20°C-målinger											
116	0,878	0,764	0,992	0,760	0,844	0,676	0,882	0,848	0,904	1,080	0,696
217	1,156	0,996	1,316	0,956	1,100	0,812	1,115	1,084	1,156	1,412	0,808



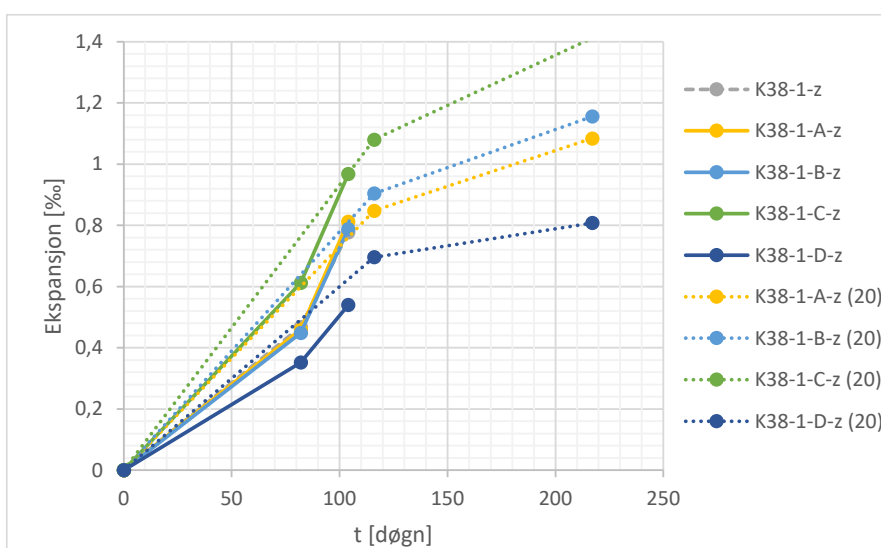
Figur B-330: Alle enkeltmålinger ved 38°C, kube K38-1



Figur B-4: Enkeltmålinger i x-retning kube K38-1 (38- og 20°C målinger)



Figur B-5: Enkeltmålinger i y-retning kube K38-1 (38- og 20°C målinger)

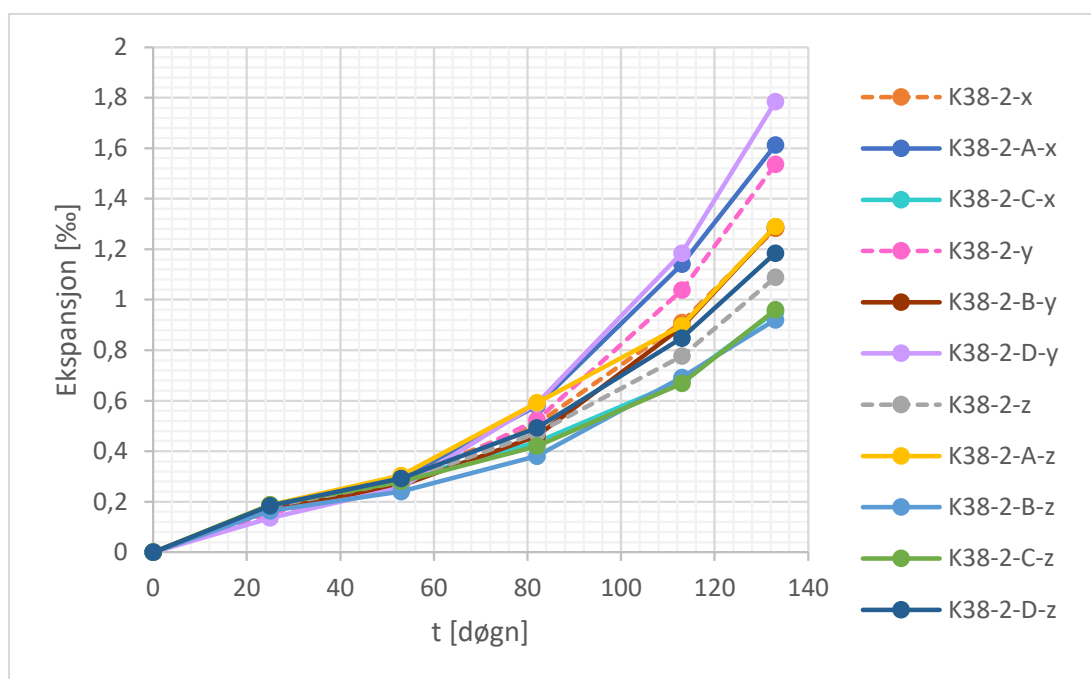


Figur B-6: Enkeltmålinger i z-retning kube K38-1 (38- og 20°C målinger)

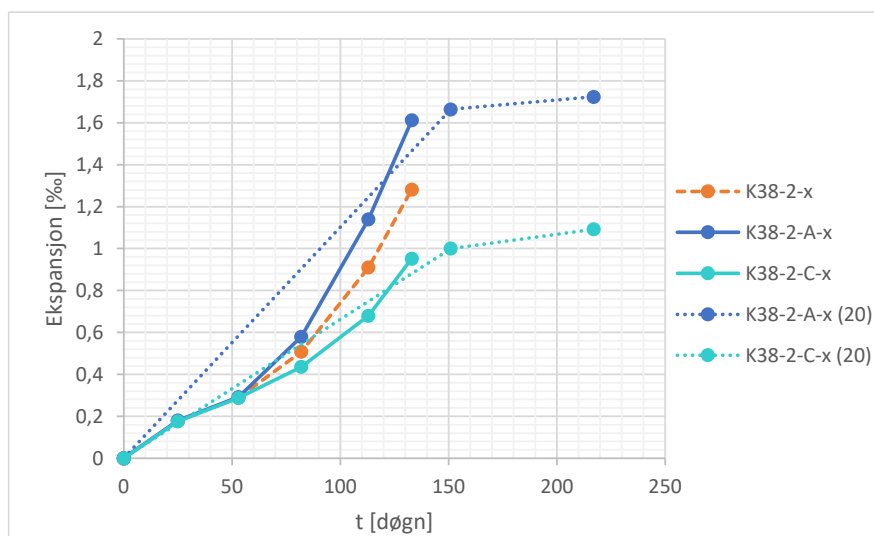
B.3: Kube K38-2

Tabell B-6: Ekspansjoner enkeltmålinger kube K38-2, fra 38- og 20 °C referanser

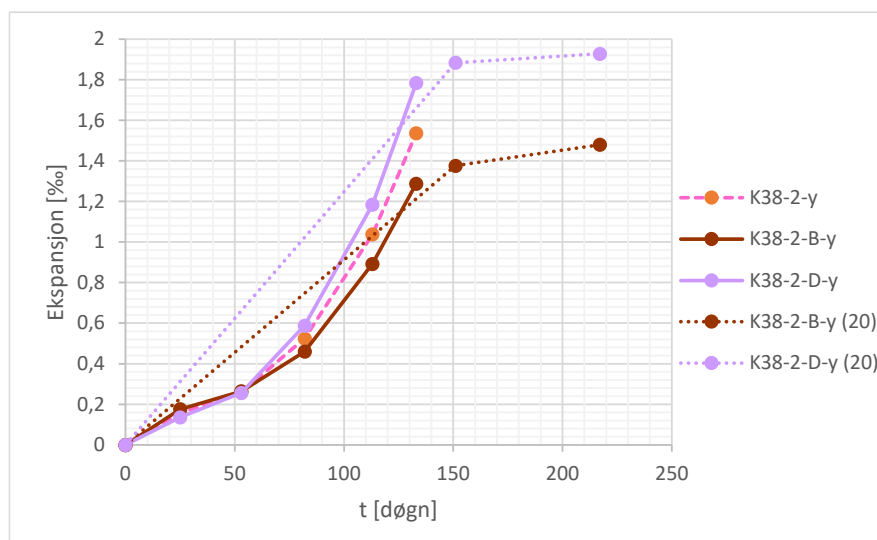
Døgn	K38-2-x	K38-2-A-x	K38-2-C-x	K38-2-y	K38-2-B-y	K38-2-D-y	K38-2-z	K38-2-A-z	K38-2-B-z	K38-2-C-z	K38-2-D-z
38 °C-målinger											
25	0,178	0,180	0,176	0,156	0,176	0,136	0,181	0,188	0,164	0,188	0,184
53	0,290	0,292	0,288	0,260	0,264	0,256	0,279	0,304	0,240	0,280	0,292
82	0,508	0,580	0,436	0,524	0,460	0,588	0,471	0,592	0,380	0,420	0,492
113	0,910	1,140	0,680	1,038	0,892	1,184	0,776	0,897	0,692	0,668	0,848
133	1,282	1,612	0,952	1,536	1,288	1,784	1,088	1,289	0,920	0,960	1,184
20 °C-målinger											
151	1,332	1,664	1,000	1,630	1,376	1,884	1,121	-	1,020	1,072	1,272
217	1,408	1,724	1,092	1,704	1,480	1,928	1,177	-	1,100	1,180	1,252



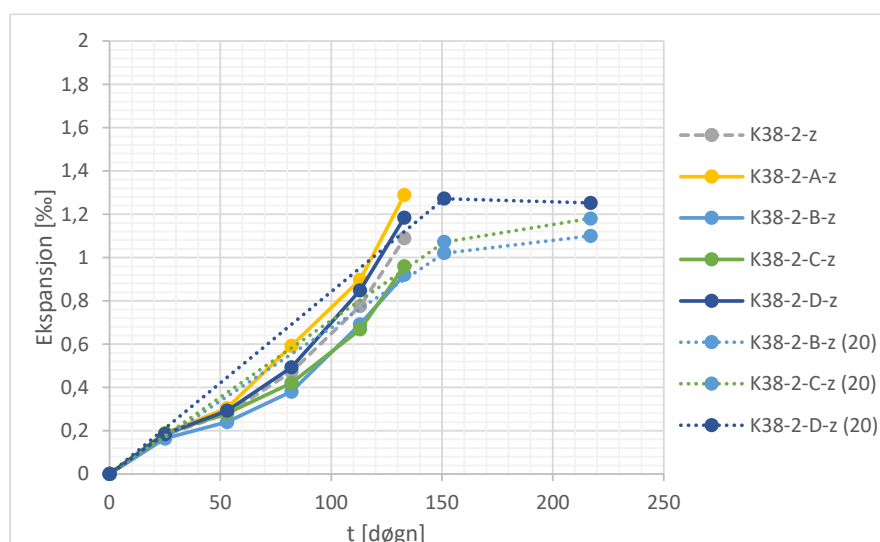
Figur B-8: Alle enkeltmålinger ved 38 °C, kube K38-2



Figur B-931: Enkeltmålinger i x-retning kube K38-2 (38- og 20 °C målinger)



Figur B-1032: Enkeltmålinger i y-retning kube K38-2 (38- og 20 °C målinger)

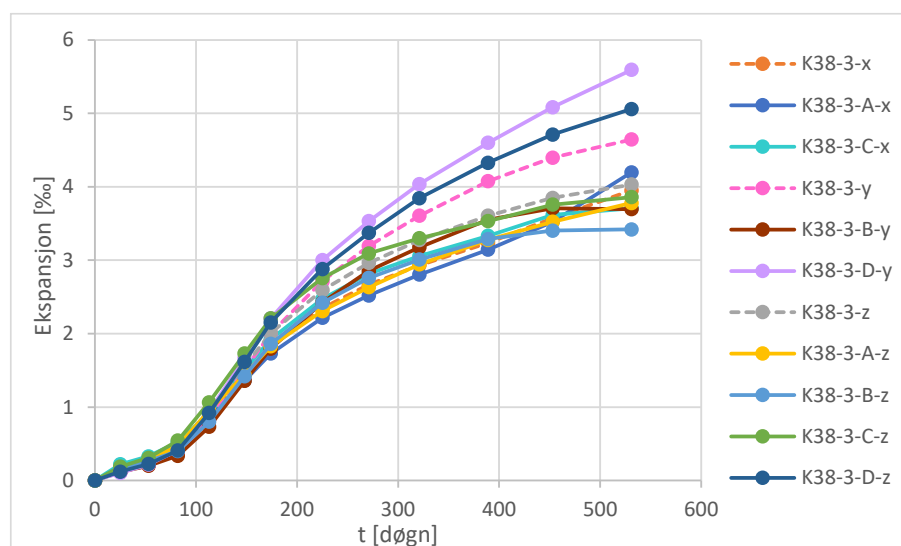


Figur B-1133: Enkeltmålinger i z-retning kube K38-2 (38- og 20 °C målinger)

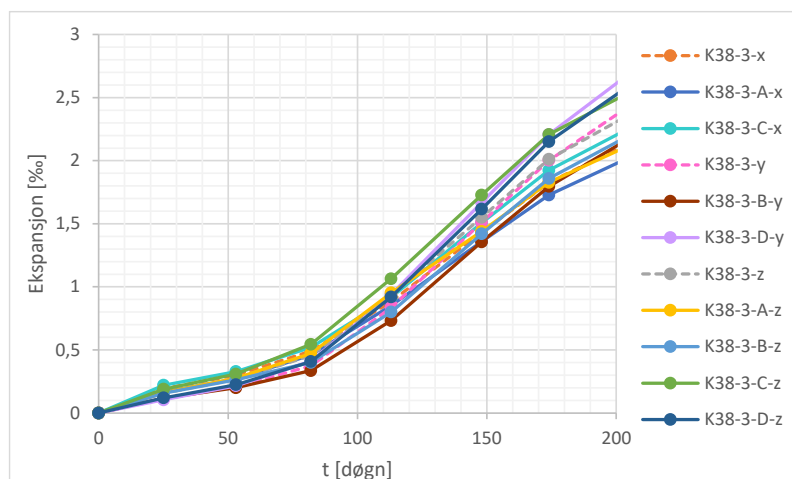
B.4: Kube K38-3

Tabell B-7: Ekspansjoner enkeltmålinger kube K38-3, fra 38- og 20°C referanser

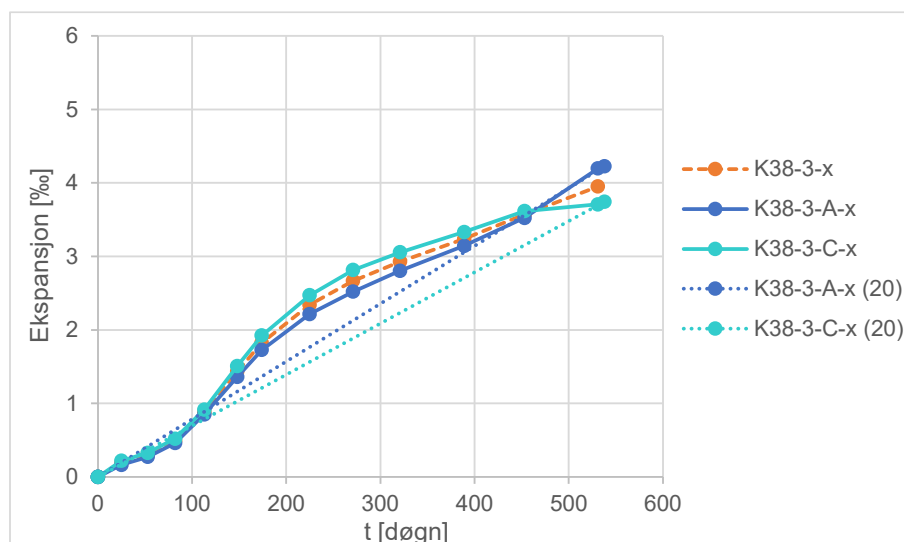
Døgn	K38-3-x	K38-3-A-x	K38-3-C-x	K38-3-y	K38-3-B-y	K38-3-D-y	K38-3-z	K38-3-A-z	K38-3-B-z	K38-3-C-z	K38-3-D-z
38°C-målinger											
25	0,192	0,164	0,220	0,110	0,116	0,104	0,156	0,160	0,156	0,188	0,12
53	0,300	0,272	0,328	0,208	0,200	0,216	0,268	0,276	0,264	0,308	0,224
82	0,490	0,460	0,520	0,374	0,336	0,412	0,456	0,472	0,400	0,544	0,408
113	0,884	0,852	0,916	0,836	0,732	0,940	0,934	0,952	0,800	1,064	0,920
148	1,434	1,360	1,508	1,512	1,356	1,668	1,551	1,440	1,420	1,728	1,616
174	1,826	1,728	1,924	2,002	1,796	2,208	2,012	1,828	1,860	2,208	2,152
225	2,344	2,216	2,472	2,712	2,424	3,000	2,591	2,308	2,420	2,756	2,880
271	2,668	2,520	2,816	3,194	2,856	3,532	2,964	2,632	2,760	3,092	3,372
321	2,930	2,804	3,056	3,606	3,176	4,036	3,274	2,944	3,008	3,30	3,844
389	3,238	3,144	3,332	4,076	3,552	4,600	3,606	3,276	3,288	3,532	4,328
453	3,570	3,524	3,616	4,396	3,708	5,084	3,849	3,524	3,404	3,756	4,712
531	3,952	4,196	3,708	4,644	3,696	5,592	4,030	3,780	3,420	3,860	5,060
20°C-målinger											
538	3,986	4,228	3,744	4,708	3,76	5,656	5,136	-	-	-	5,136



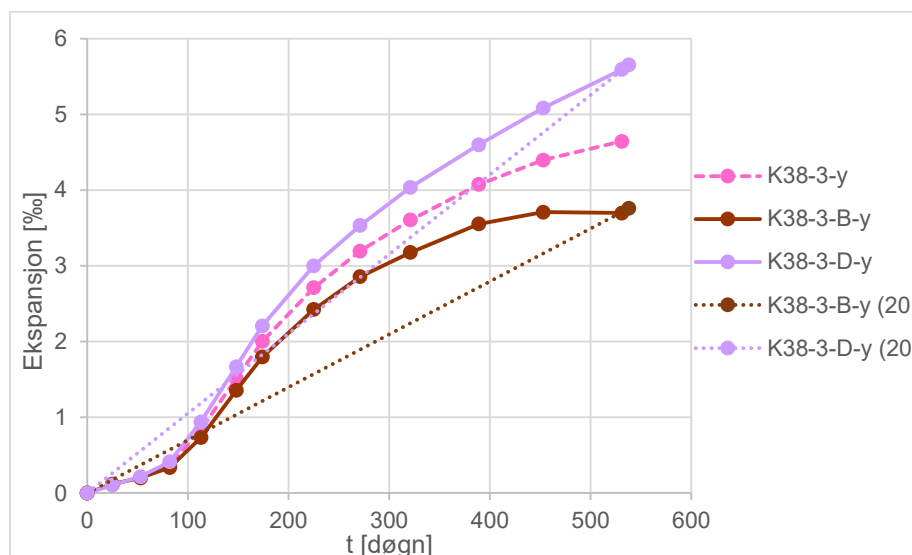
Figur B-1234: Alle enkeltmålinger ved 38°C, kube K38-3



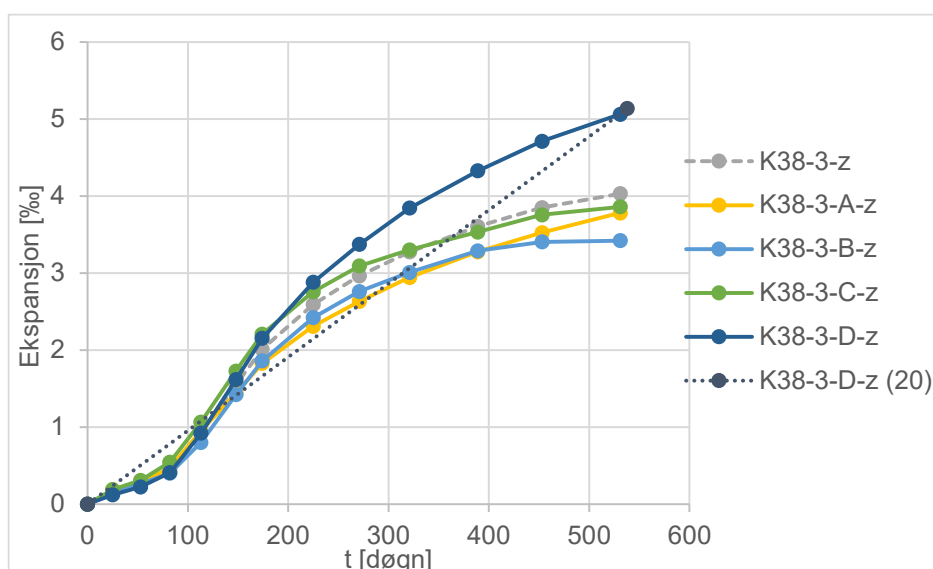
Figur B-13: Alle enkeltmålinger ved 38°C, kube K38-3 frem til 200 døgn



Figur B-1435: Enkeltmålinger i x-retning kube K38-3 (38- og 20°C målinger)



Figur B-1536: Enkeltmålinger i y-retning kube K38-3 (38- og 20°C målinger)



Figur B-16: Enkeltmålinger i z-retning kube K38-3 (38- og 20°C målinger)

B.5: Kube KB38 (Belastet kube)

Alle målingene i tabellene er mellom like tilstander (ekspansjon regnet ut fra ulike referanser). Ved likt antall døgn skal det derfor i utgangspunktet være like ekspansjoner.

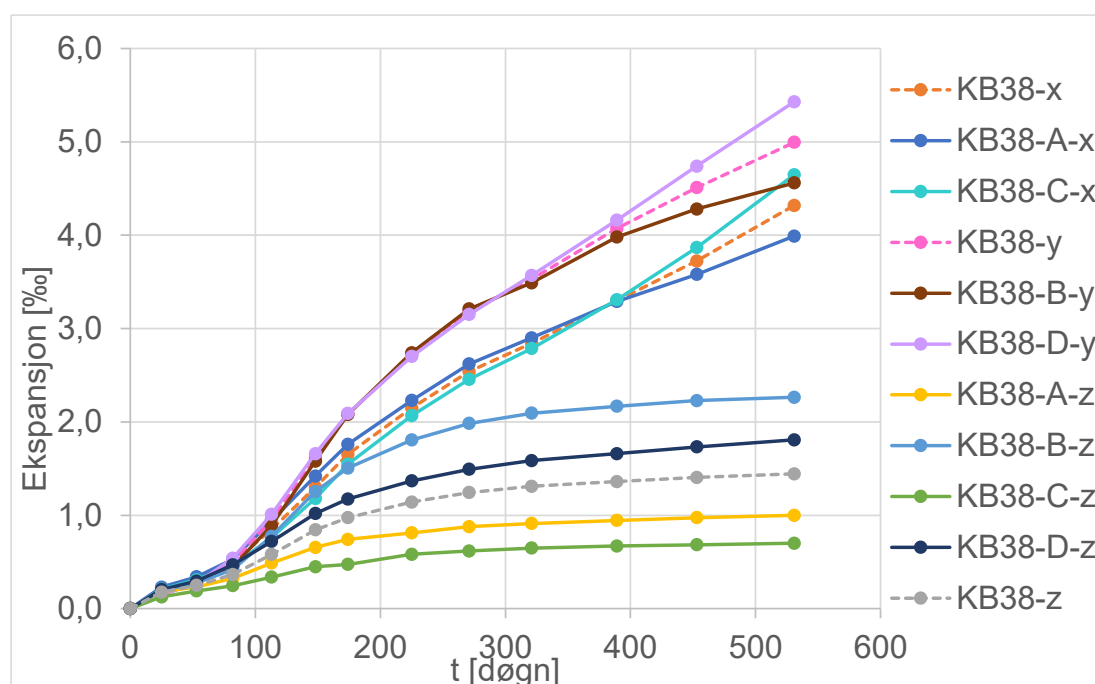
Tabell B-8: Ekspansjoner enkeltmålinger kube KB38 i x- og y-retning, fra 38- og 20°C referanser (analog + digital), temperatur og elastisk def

Døgn	KB38- x	KB38-A- x	KB38-C-x	K38-4- y	KB38-B-y	KB38-D- y
38°C-målinger (m.last) – analog						
25	0,220	0,230	0,210	0,150	0,150	0,150
53	0,325	0,340	0,310	0,275	0,280	0,270
82	0,495	0,530	0,460	0,495	0,450	0,540
113	0,850	0,940	0,760	0,950	0,890	1,010
148	1,300	1,420	1,180	1,620	1,580	1,660
174	1,654	1,760	1,547	2,085	2,080	2,090
225	2,149	2,230	2,067	2,720	2,740	2,700
271	2,539	2,620	2,457	3,180	3,210	3,150
321	2,844	2,900	2,787	3,530	3,490	3,570
389	3,299	3,290	3,307	4,070	3,980	4,160
453	3,724	3,580	3,867	4,510	4,280	4,740
531	4,319	3,990	4,647	4,995	4,560	5,430
20°C-målinger (u.last) - analog						
543	-	3,800	-	4,895	4,440	5,350
551	-	3,810	-	4,935	4,440	5,430
20°C-målinger (u.last) - digitalt						
543	-	3,884	-	4,982	4,516	5,448
551	-	3,908	-	5,030	4,532	5,528

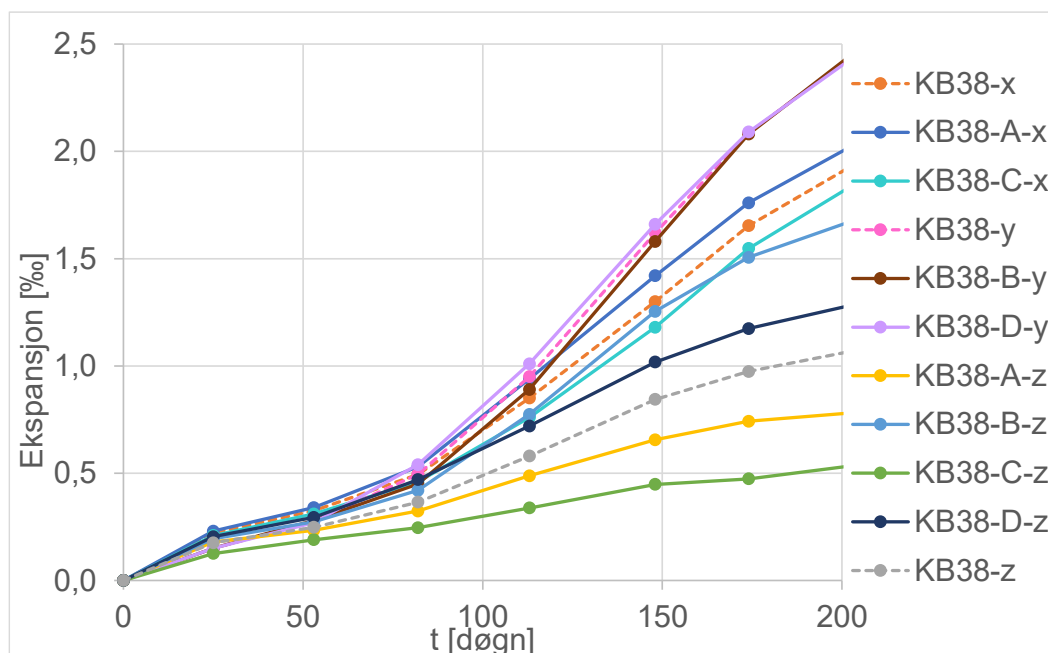
Tabell B-9: Ekspansjoner enkeltmålinger kube KB38 i z-retning, fra 38- og 20°C referanser, temperatur og elastisk deformasjon

Døgn	KB38-z	KB38-A-z	KB38-B-z	KB38-C-z	KB38-D-z
38°C-målinger (m.last)					
25	0,176	0,180	0,194	0,126	0,204
53	0,248	0,234	0,274	0,190	0,294
82	0,365	0,324	0,420	0,246	0,470
113	0,580	0,488	0,774	0,338	0,720
148	0,844	0,656	1,254	0,448	1,018
174	0,974	0,742	1,506	0,474	1,174
225	1,142	0,812	1,806	0,582	1,368
271	1,243	0,878	1,984	0,618	1,492
321	1,310	0,912	2,094	0,648	1,586
389	1,361	0,944	2,168	0,670	1,660
453	1,405	0,974	2,228	0,684	1,732
531	1,443	1,000	2,264	0,700	1,808
20°C-målinger (u.last)					
543	-	0,972	2,290	-	-
551	-	-	2,254	-	-

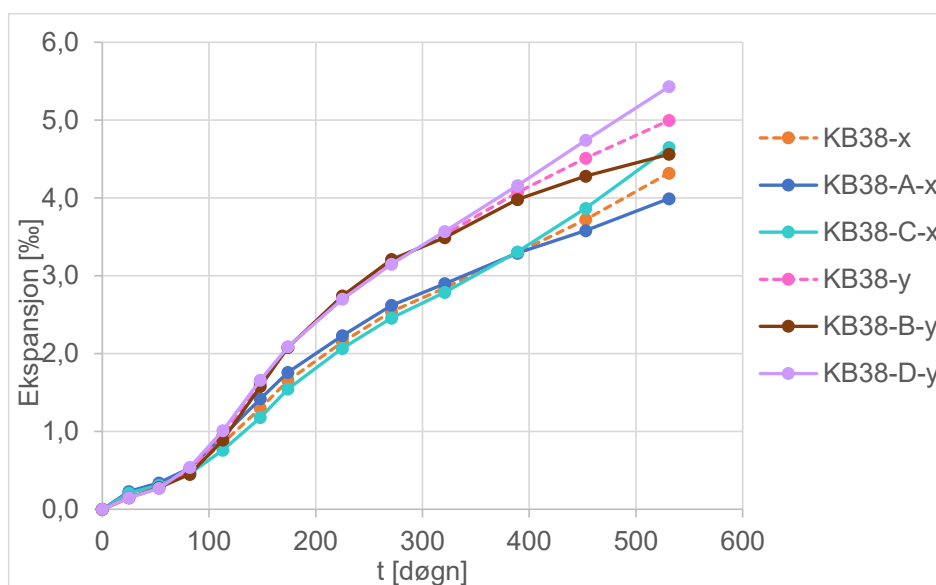
Alle målinger i z-retning er gjennomsnitt av to målinger i ¼-punktet på samme overflate. Ser at det spesielt for z-retning er stor variasjon på de ulike sideflatene (variasjonskoeffisient lik 50 % for siste måling). Det er også her en forskjell på elastisk deformasjon ved på og avlasting. Også her er 20 °C målingene noe større enn ved 38 °C, men forskjellen er mye mindre enn for kubene fra 2019 (RP38-5).



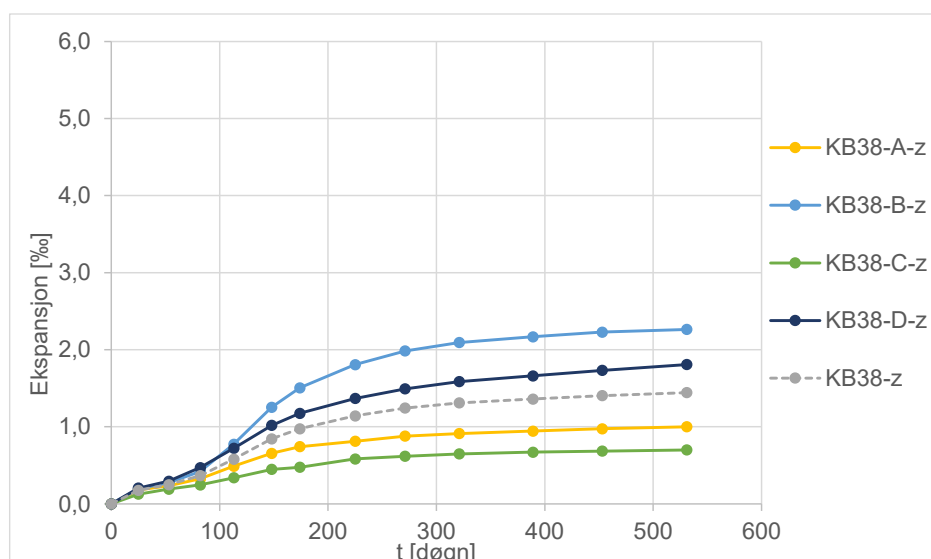
Figur B-1737: Alle enkeltmålinger ved 38°C for kube KB38



Figur B-1838: Alle enkeltmålinger ved 38°C for kube KB38 etter 200 døgn

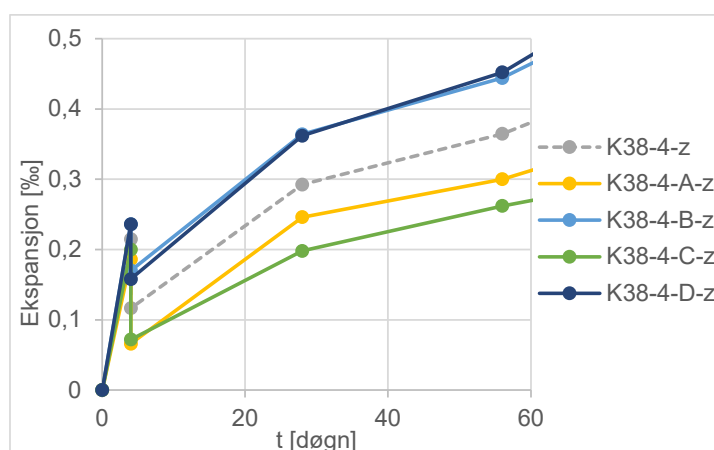


Figur B-19: Alle enkeltmålinger i tverretning (x- og y-retning)



Figur B-2039: Alle enkeltmålinger i lastretning (z-retning)

Figur B-19 viser stor spredning i lastretning, selv om gjennomsnittet i lengderetning er ganske lik gjennomsnittet for de belastede kubene fra 2019. Dette kan sees i sammenheng med den elastiske deformasjonen Figur B-20 viser de tre første ekspansjonsmålingene inkludert den elastiske deformasjonen.



Figur B-2140: Første fire målinger i lastretning inkludert elastisk deformasjon

Mye tyder på at det er en eksentrisitet i lasten og at dette derfor gir store utslag på overflatene hvilke sider som ekspanderer mest. Ser det er samsvar mellom hvilken sideflate som har størst/minst målt elastisk deformasjon (og dere størst/minst utregnet spenning) og den videre ekspansjonen gitt i figur 20. En spenning på 3 MPa gir en elastisk deformasjon i lastretningen (z) på ca. 0,10 ‰ med en E-modul rundt 30000 MPa. Dette stemmer ok med Figur B-20. Den elastiske deformasjonen på hver flate er gitt i tabellen under. Den utregnede spenningen dette tilsvarer er også gitt for hver flate. E-modul er her valgt til 32000 MPa.

Tabell B-10: Beregnet trykkspenning på de ulike sideflatene basert på målt elastisk deformasjon

	KB38-z	KB38-A-z	KB38-B-z	KB38-C-z	KB38-D-z

El def [‰]	-0,098	-0,120	-0,066	-0,128	-0,078
σ [MPa]	3,136	3,84	2,112	4,096	2,496

Siden det er sideflate B og D, som er to motstående sideflater, som ekspanderer mest er tøyningstilstanden imidlertid ikke plan. Siden stålplatene er så stive, er de derfor ikke i stand til å sette opp en slik forskjell i spenninger. Det må derfor være en annen forklaring. Den mest sannsynlig er at det er teflonplatene mellom platene og betongen som gir betongen mulighet til å ekspandere ulikt da den kan «flyte ut». Dette kan også forklare at krafttilstanden i lastcella forble ganske konstant selv om betongen ekspanderte i z-retningen. Siden kubene kun har 1,5 cm fra målepunktet til de belastede endene, kan det også påvirke målingene og gjøre at de målte tøyningen antagelig er litt høye.

I tverretning (x og y) skal flatene teoretisk sett få en tverrutvidelse lik 0,025 ‰. Målingene gir derimot en reduksjon også her, men i samme størrelsesorden (-0,02 (x) og -0,03 (y)) Se tabell B-6. Tabell B-8 viser utviklingen av trykkspenningen avlest fra lastcellene.

Tabell B-11: Trykkspenninger på kube avlest av lastcellen

26/09	20/11	21/12	15/01	19/03	20/04	07/05	01/06	08/07	11/08	18/10
168,2	153,0	155,3	155,7	156,8	157,2	157,6	157,7	158,2	158,3	158,9

Lasten går alltid ned etter pålasting (mellom måling 26/09 og 20/11). Øker deretter jevnt fra 20/11/2020 til 18/10/2021. 18/10 var siste måling før det ble frakoblet.

$\Delta = 5,89 \text{ kN} = 0,11 \text{ MPa}$. Dette gir en tøyning på ca. 0,004 ‰.

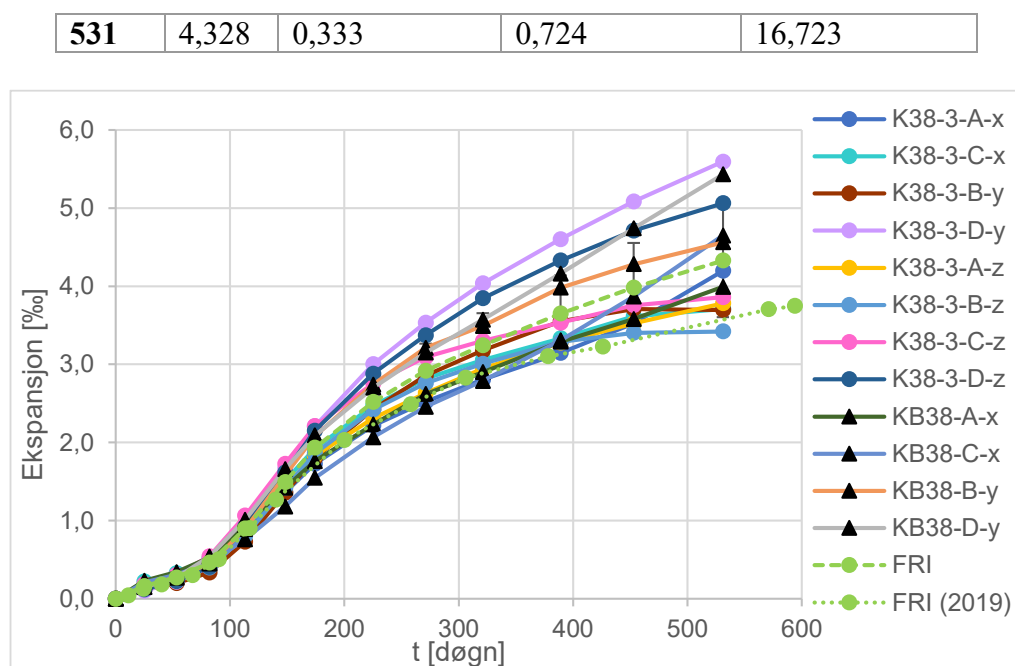
Spenningen øker dermed fra 20/11/2020 til 18/10/2021 med 2,9 til 3 MPa.

B.6: Fri ekspansjon

Middelverdien av 12 målinger. Alle frie retninger på kube K38-3 og KB38. Verdi av Fastholdt (KB38-z)/Fri, standardavviket og variasjonskoeffisienten for den fri ekspansjon er vist i tabell B-9.

Tabell B-12: Fri ekspansjon, fastholdt/Fri, Standardavvik fri ekspansjon og variasjonskoeffisient fri ekspansjon

Døgn	FRI	Fastholdt/FRI	Standardavvik, FRI	Variasjonskoeffisient [%]
0	0	1	0	0
25	0,164	1,073	0,041	25,003
53	0,274	0,905	0,044	16,031
82	0,461	0,792	0,065	14,054
113	0,898	0,646	0,098	10,918
148	1,495	0,565	0,161	10,760
174	1,932	0,504	0,214	11,054
225	2,518	0,454	0,293	11,639
271	2,918	0,426	0,348	11,930
321	3,243	0,404	0,412	12,693
389	3,649	0,373	0,489	13,400
453	3,983	0,353	0,572	14,362

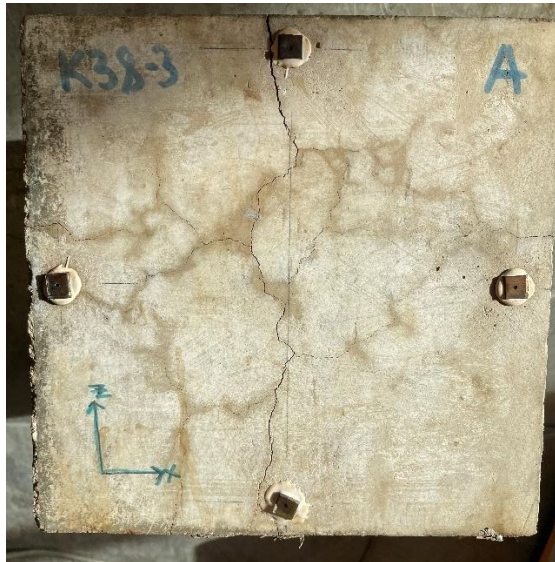


Figur B-22: Referanse fri retning for kube K38-3 og KB38 markert med grønn stiplet linje

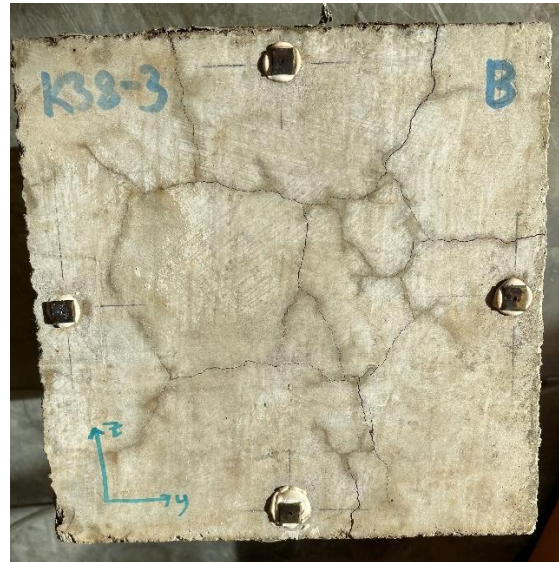
B.6: Bilder

Figur B-23 og B-24 viser bilder av sideflatene på kube K38-3 og KB38 etter endt ekspansjon. Kubene hadde da vært lagret i 531 dager og den frie ekspansjonen på kubene var da 4,3 %

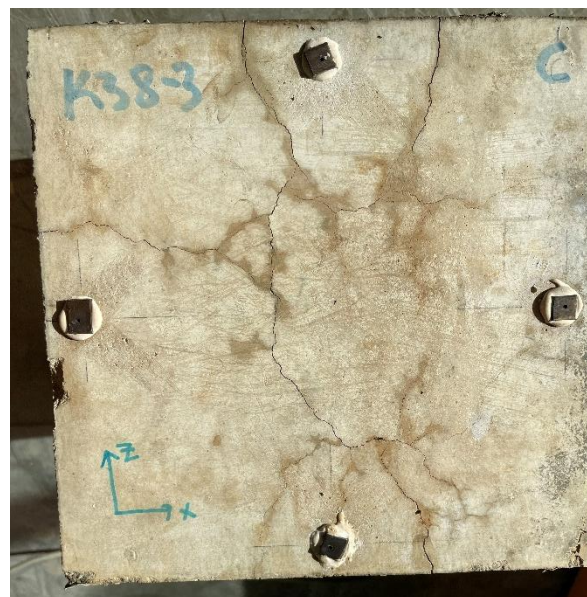
Kube K38-3:



a) Side A



b) Side B



c) Side C



d) Side D

Figur B-23: Kube K38-3

Kube KB38/KB38-4:



a) Side A (m. last)



b) Side B (m. last)



c) Side A (u. last) – Tydelig riss i lastretningen



d) Side B (u. last)



e) Side C (m. last)

f) Side D (m. last)

Figur B-24: Kube KB38/K38-4

VEDLEGG C: ENKELTMÅLINGER PRISMER 2019

Alle målinger er her ved 38°C. Alle tøyninger er oppgitt i %.

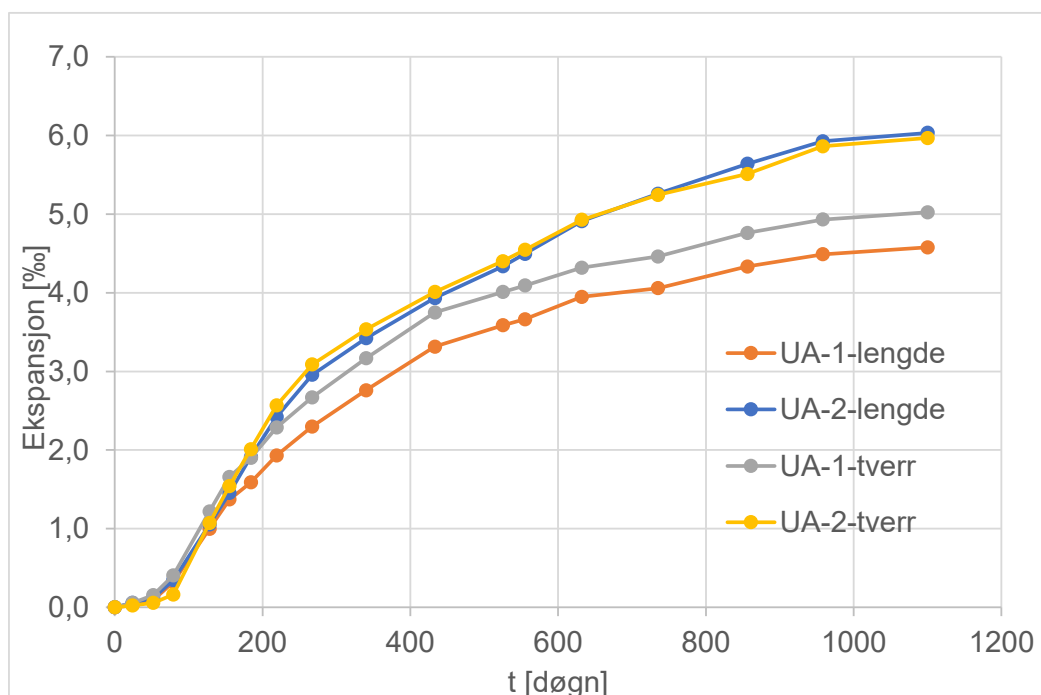
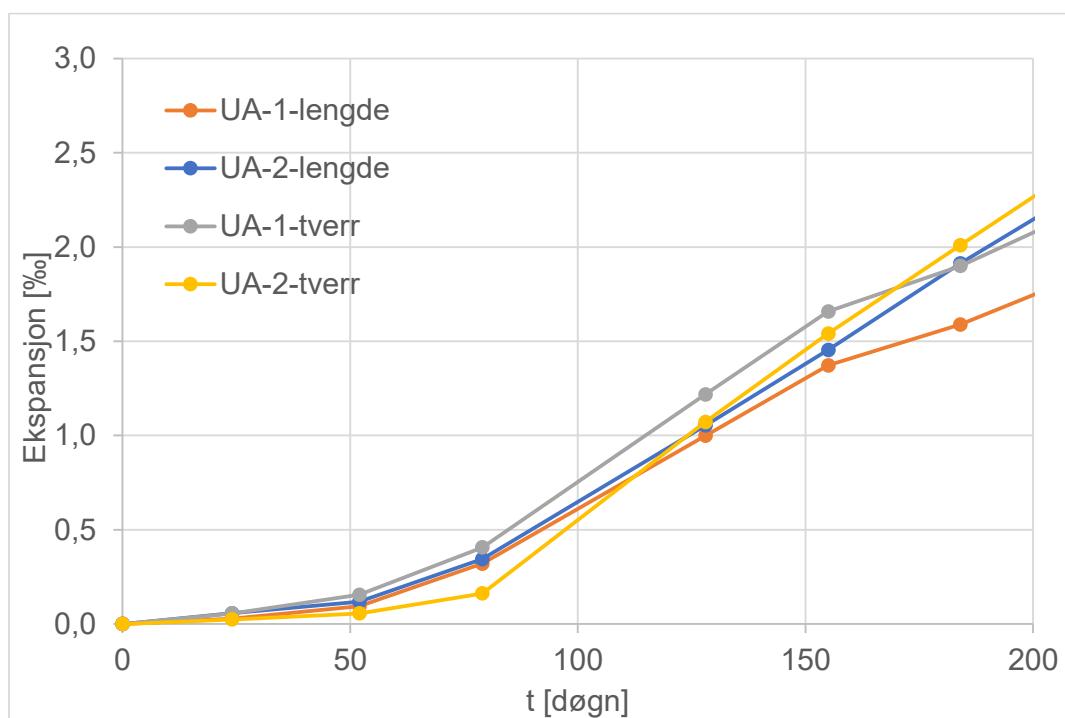
C.1: Uarmerte prismer; P-UA-1 og P-UA 2

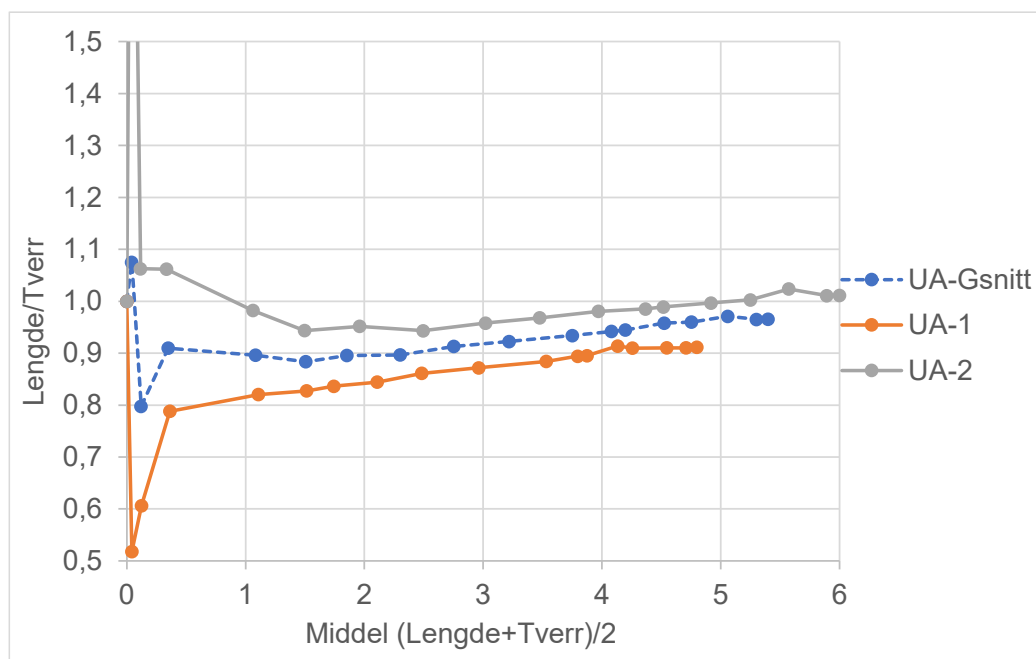
Tabell C-13: Alle ekspansjoner enkeltmålinger prisme P-UA-1

Døgn	UA-1- lengde	UA-1- tverr	UA-1- A- lengde	UA-1- A- tverr	UA-1- B- lengde	UA-1- B- tverr	UA-1- C- lengde	UA-1- C- tverr	UA-1- D- lengde	UA-1- D- tverr
24	0,029	0,056	0,036	0,064	0,008	0,028	0,072	0,072	0,000	0,060
52	0,094	0,155	0,104	0,160	0,080	0,124	0,156	0,184	0,036	0,152
79	0,320	0,406	0,280	0,356	0,320	0,384	0,444	0,556	0,236	0,328
128	0,999	1,218	0,928	1,144	1,092	1,396	1,168	1,540	0,808	0,792
155	1,372	1,658	1,292	1,608	1,536	1,948	1,556	2,060	1,104	1,016
184	1,589	1,900	1,396	1,732	1,736	2,164	1,852	2,404	1,372	1,300
219	1,932	2,288	1,644	1,996	2,208	2,728	2,296	2,936	1,580	1,492
267	2,299	2,670	2,028	2,404	2,560	3,104	2,652	3,396	1,956	1,776
340	2,760	3,166	2,356	2,756	3,060	3,588	3,220	4,220	2,404	2,100
433	3,314	3,748	2,816	3,372	3,600	4,004	3,868	5,152	2,972	2,464
525	3,585	4,009	3,172	3,724	3,776	4,200	4,012	5,332	3,380	2,780
555	3,663	4,091	3,252	3,832	3,844	4,272	4,064	5,404	3,492	2,856
632	3,947	4,319	3,484	4,052	3,996	4,392	4,356	5,572	3,952	3,260
735	4,057	4,460	3,664	4,244	4,032	4,432	4,400	5,600	4,132	3,564
856	4,333	4,761	3,920	4,468	4,352	4,764	4,688	5,880	4,372	3,932
958	4,488	4,930	4,208	4,736	4,536	4,956	4,696	5,900	4,512	4,128
1100	4,577	5,023	4,336	4,856	4,616	5,048	4,748	5,940	4,608	4,248

Tabell C-14: Alle ekspansjoner enkeltmålinger prisme P-UA-2

Døgn	UA-2- lengde	UA-2- tverr	UA-2- A- lengde	UA-2- A- tverr	UA-2- B- lengde	UA-2- B- tverr	UA-2- C- lengde	UA-2- C- tverr	UA-2- D- lengde	UA-2- D- tverr
24	0,057	0,024	0,036	0,012	0,080	0,004	0,056	0,052	0,056	0,028
52	0,119	0,112	0,108	0,100	0,168	0,088	0,096	0,140	0,104	0,120
79	0,344	0,324	0,292	0,312	0,408	0,328	0,328	0,332	0,348	0,324
128	1,053	1,072	0,920	1,236	1,192	1,084	1,104	0,992	0,996	0,976
155	1,454	1,541	1,296	1,708	1,572	1,564	1,576	1,460	1,372	1,432
184	1,913	2,010	1,684	2,180	1,976	2,032	2,116	1,952	1,876	1,876
219	2,423	2,569	2,144	2,776	2,380	2,548	2,716	2,492	2,452	2,460
267	2,957	3,087	2,528	3,252	2,648	2,840	3,416	3,112	3,236	3,144
340	3,421	3,534	2,820	3,604	2,984	3,287	4,052	3,636	3,828	3,608
433	3,932	4,010	3,336	4,208	3,372	3,687	4,608	4,064	4,412	4,080
525	4,335	4,401	3,860	4,836	3,820	4,067	4,900	4,316	4,760	4,384
555	4,494	4,545	3,932	4,928	3,968	4,215	5,164	4,536	4,912	4,500
632	4,911	4,928	4,328	5,360	4,376	4,523	5,576	4,944	5,364	4,884
735	5,258	5,244	4,704	5,748	4,716	4,775	5,896	5,320	5,716	5,132
856	5,639	5,510	5,156	6,240	4,988	5,015	6,040	5,452	6,372	5,332
958	5,925	5,862	5,392	6,504	5,480	5,431	6,576	5,964	6,252	5,548
1100	6,033	5,967	5,472	6,568	5,664	5,591	6,708	6,100	6,288	5,608

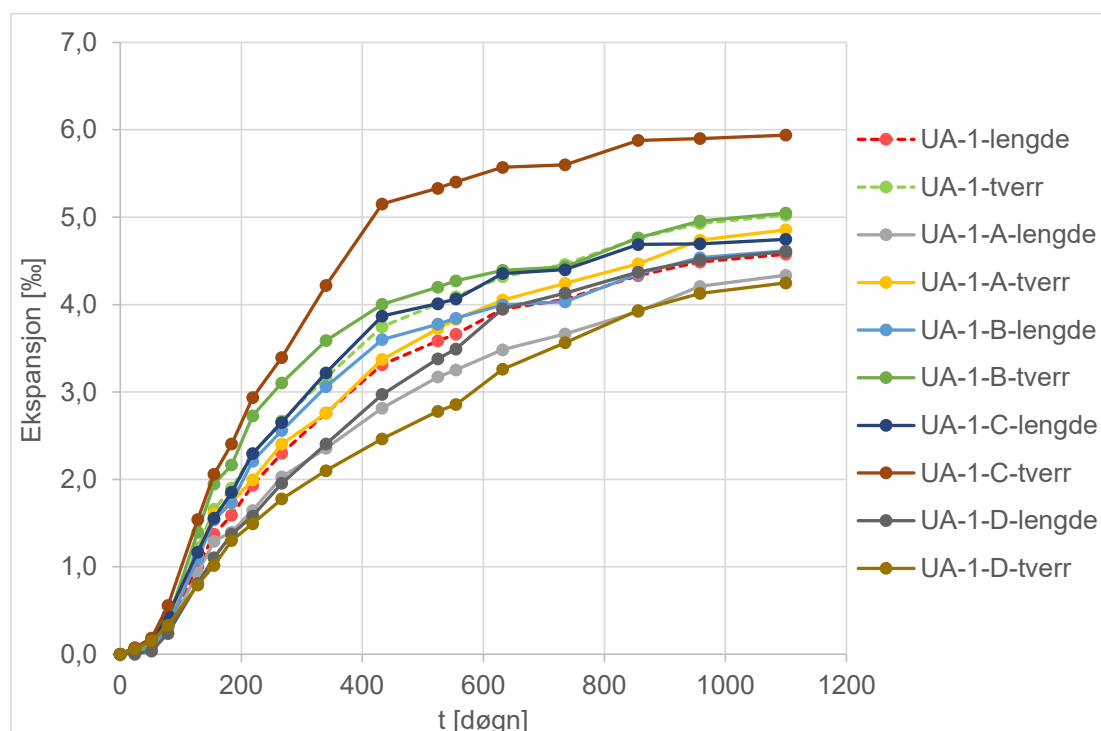
Middel:*Figur C-141: Middelverdier i lengde- og tverretning P-UA-1 og P-UA-2**Figur C-2: Middelverdier i lengde- og tverretning P-UA-1 og P-UA-2 frem til 200 døgn*



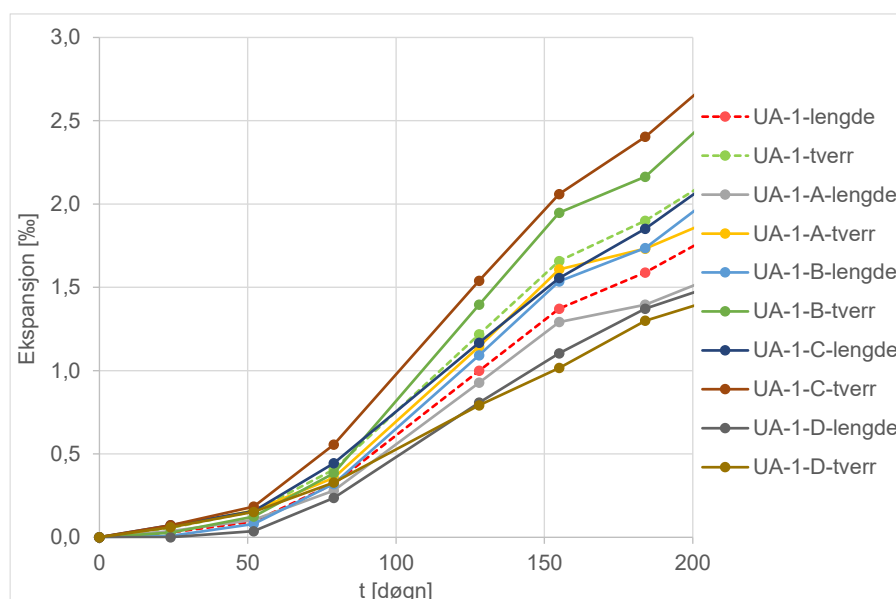
Figur C-342: Lengde/tverretning mot middel for prisme P-UA-1 og P-UA-2

Dette forholdet er ganske stabilt selv om det øker noe med ekspansjonen. Starten svinger mye, men fra ca. 0,5 % og utover er det ganske stabilt. Dette forholdet ser ut til å være rundt 0,9, men om det skal antas en konstant relasjon eller noe som øker litt med ekspansjonen, må vurderes litt nærmere.

P-UA-1:



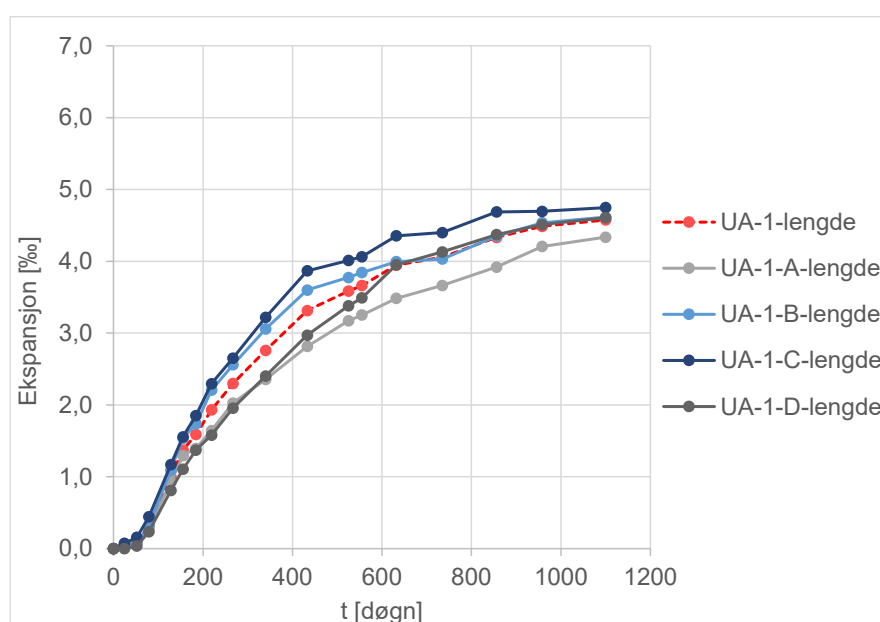
Figur C-443: Ekspansjoner alle enkeltmålinger prisme P-UA-1



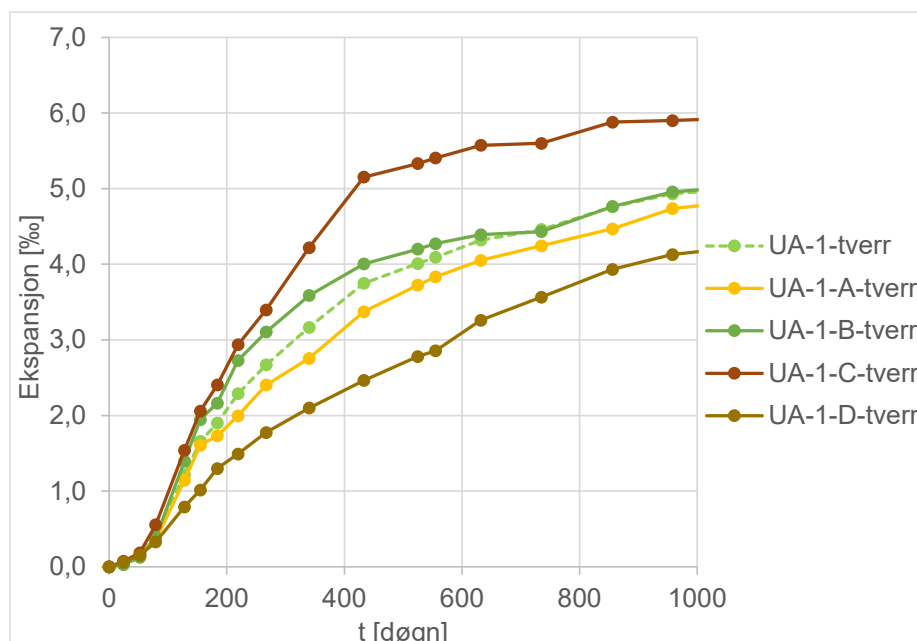
Figur C-5: Ekspansjoner alle enkeltmålinger prisme P-UA-1 frem til 200 døgn

En viss spredning på resultatene allerede ved første måling etter ca. 25 døgn. Ganske jevn utvikling til ca. 50 døgn. Da øker ekspansjonshastigheten og spredningen mellom enkeltverdiene blir også etter hvert større. Ved 50 døgn er spredningen og middelveien ca. 0,15 og ca. 0,2 ‰, ved 100 døgn ca. 0,5 og ca. 0,7 ‰ og ved 200 døgn ca. 1,2 og ca. 1,8 ‰. Spredningen er størst etter ca. 400 døgn da den er ca. 2,8 ‰ for en middelvei på ca. 3,4 ‰. Videre utover avtar spredningen litt med tiden og er ca. 1,8 ‰ ved 1000 døgn (960 døgn). Middelveien er da ca. 4,7 ‰. Kurvene flater av etter ca. 400 døgn, men stiger stort sett under hele dette forsøket.

Etter 100 døgn forandrer ikke de innbyrdes posisjonene til kurvene seg så mye. Lavest i starten er tverr-retningen til flate D og lengderetningen til flate A og flate D. Høyest i starten er tverr-retningene til flate B og flate C, men etter hvert blir tverr-retningen til flate C helt dominerende og er over 1 ‰ større enn tverr-retningen til flate B som er nest størst. Lengderetningen til flate D blir lik lengderetningen til flate B etter ca. 600 døgn. De verdiene er da også ganske lik tverr-retningen til flate A. Lengderetningen til flate C er da også blitt ganske lik tverr-retningen til flate B. Fra 600 døgn er det derfor bare lengderetningen til flate A og tverr-retningen til flate D som er en del lavere enn "tyngden" av de andre målingene.



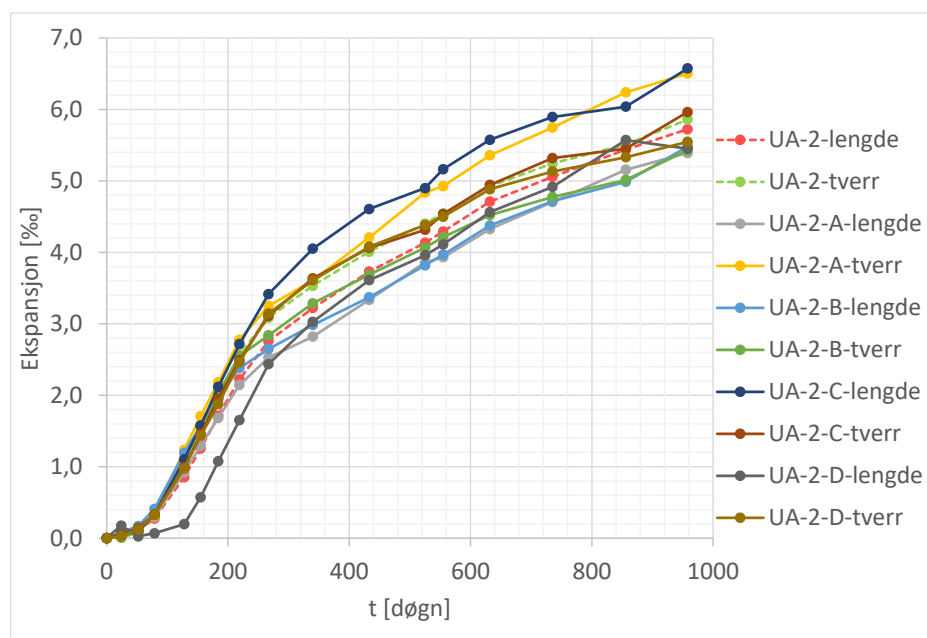
Figur C-44: Ekspansjoner enkeltmålinger i lengderetning prisme P-UA-1



Figur C-745: Ekspansjoner enkeltmålinger i tverretning prisme P-UA-1

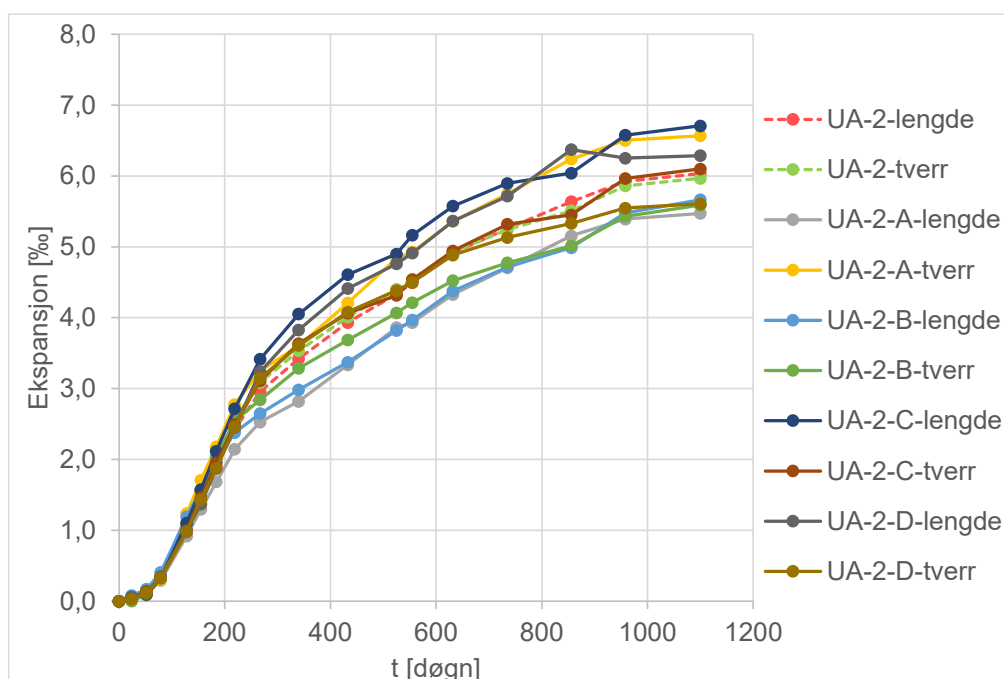
Enkeltmålingene er tidligere kommentert, men siden flate B og flate C i tverretning har en del større ekspansjon enn flate A og D fra 100 – 600 døgn, så tyder det på at denne prøven har størst ekspansjon i hjørnet mellom flate B og flate C og at den økte tøyningen i det området "bøyer" tverrsnittet om en akse gjennom hjørne A-B og hjørne C-D. Fra 600 døgn og utover dreier så denne akse mot midt i flate B og flate D. Hvis prismet virker slik, vil det også sette opp indre spenninger som gir trykk der ekspansjonen er størst og strekk der den er minst.

P-UA-2:

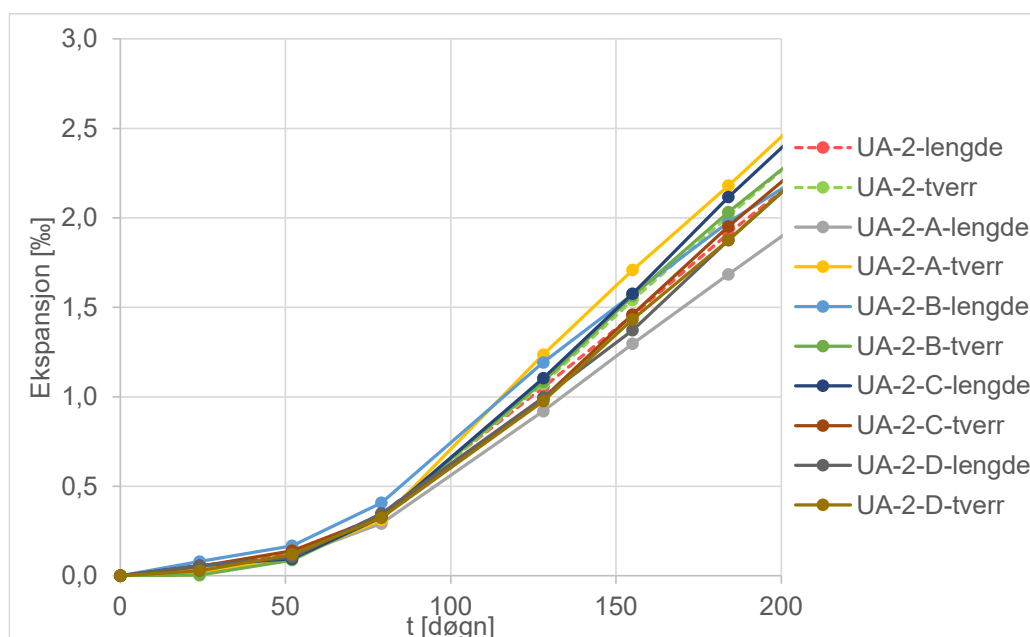


Figur C-846: Ekspansjoner alle enkeltmålinger prisme P-UA-2 (før justering av UA-2-D-lengde)

Her er det åpenbart noe galt med målingene i lengderetningen til flate D i starten. Fra 4. måling og utover ser de imidlertid ut til å være riktige. Referansen til denne målingen er derfor blitt justert slik at 4. måling gir en ekspansjon på 1 ‰ (0,8 ‰ i referansen). De tidligere målingene er så justert slik at den delen av kurven følger de andre kurvene. Alternativet er å ta bort hele denne kurven. Tabell C- 2 viser den justerte verdien. Justert kurve er vist i Figur C-8.

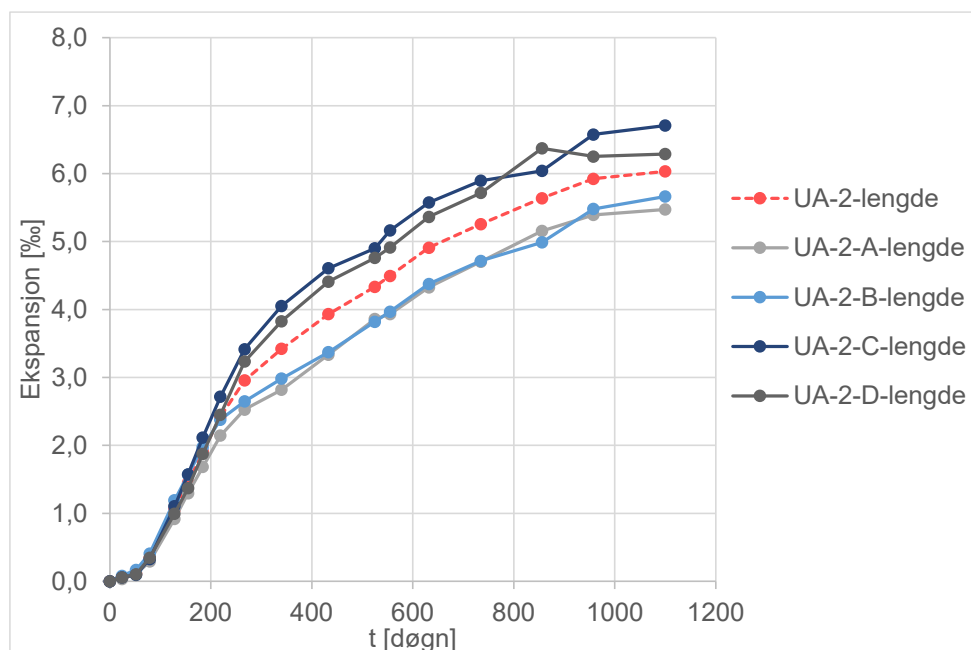


Figur C-947: Ekspansjoner alle enkeltmålinger prisme P-UA-2 (etter justering av UA-2-D-lengde)



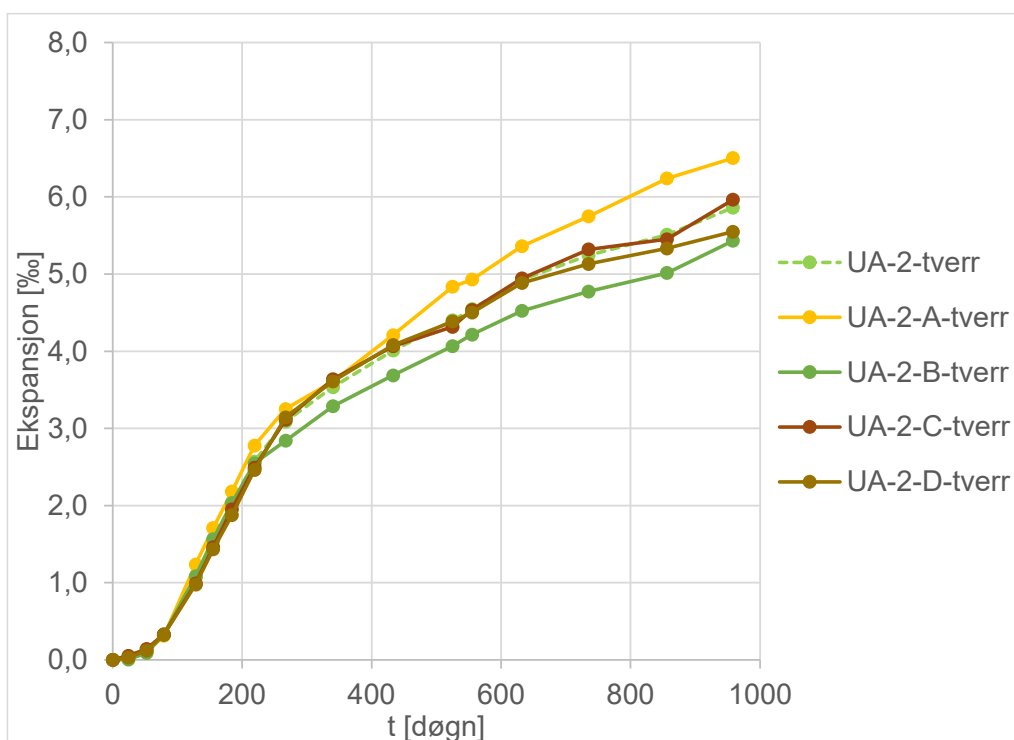
Figur C-1048: Ekspansjoner alle enkeltmålinger prisme P-UA-2 (etter justering av UA-2-D-lengde) frem til 200 døgn

Etter denne justeringen av lengderetningen til flate D, blir målingene på dette prismet ganske like helt til ekspansjonen er ca. 2 ‰ etter ca. 200 døgn. Spredningen mellom enkeltmålingene er da ca. 0,5 ‰. Lavest ved denne ekspansjonen er lengderetningen til flate A. Høyest er tverr-retningen til flate A og lengderetningen til flate C. Etter hvert blir lengderetningen til flate C og den justerte kurven for lengderetningen til flate D, høyest. I dette området er det lengderetningene til flate A og flate B og tverr-retningen til flate C som er lavest. Det er imidlertid mindre spredning mellom målingene på dette prismet. Fra ca. 300 døgn og videre utover i tid er den ca. 1,2 ‰. Middelverdien er ca. 3,0 ‰ ved 300 døgn og ca. 6,0 ‰ ved 960 døgn. Disse kurvene holder også sine innbyrdes posisjoner ganske godt etter ca. 300 dager. De øker også ganske likt bortsett fra tverr-retningen til flate A som øker noe mer enn de andre målingene.



Figur C-1149: Ekspansjoner enkeltmålinger i lengderetning prisme P-UA-2

Vi ser samme tendens her som for UA-1, ved at dette prismet ser ut til å "bøye seg" om en akse gjennom hjørne A-D og hjørne B-C.



Figur C-1250: Ekspansjoner enkeltmålinger i tverretning prisme P-UA-2

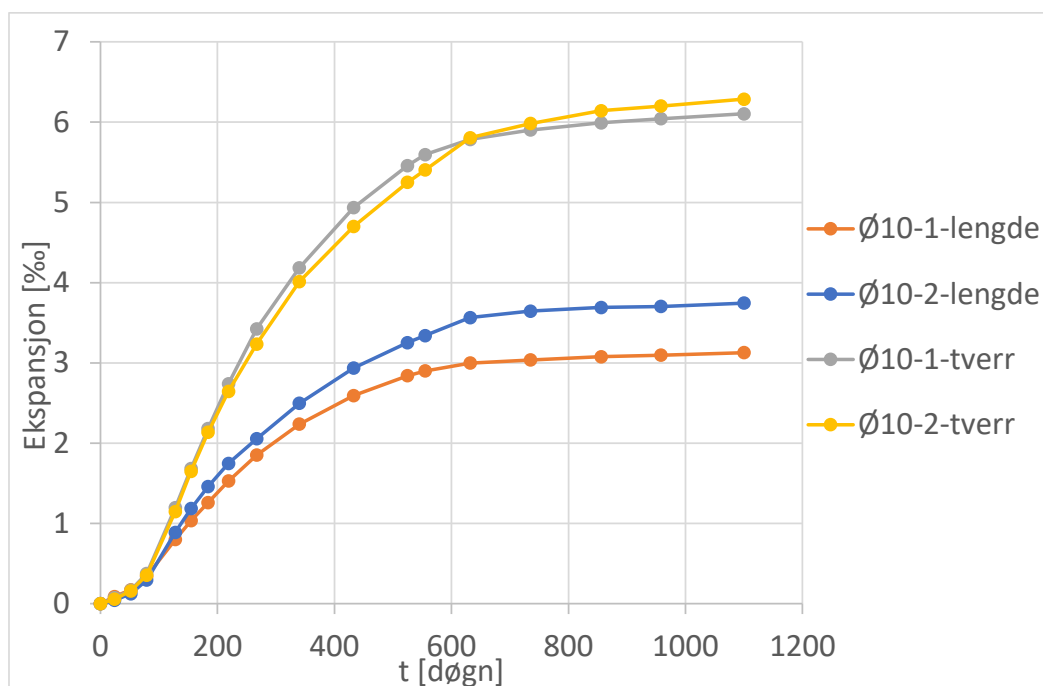
C.2: Prismer med 4Ø10 mm stenger; P-Ø10-1 og P-Ø10-2

Tabell C-15: Alle ekspansjoner enkeltmålinger prisme P-Ø10-1

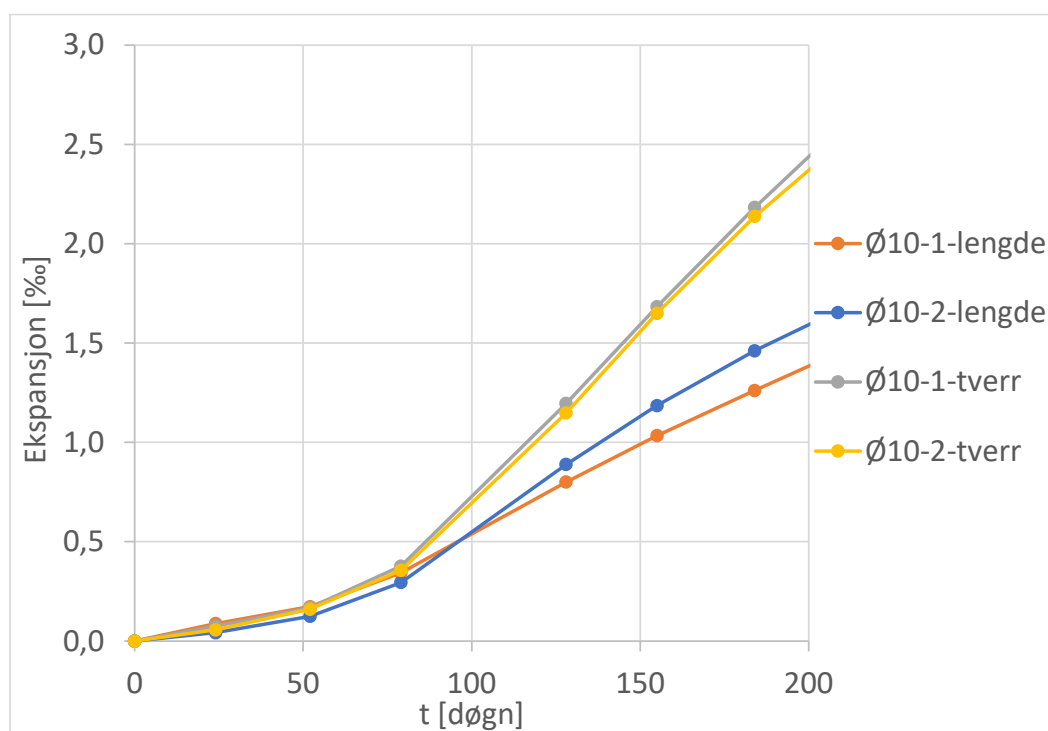
Døgn	Ø10-1- lengde	Ø10-1- tverr	Ø10-1- A- lengde	Ø10-1- A- tverr	Ø10-1- B- lengde	Ø10-1- B- tverr	Ø10-1- C- lengde	Ø10-1- C- tverr	Ø10-1- D- lengde	Ø10-1- D- tverr
24	0,088	0,074	0,132	0,064	0,072	0,092	0,064	0,056	0,084	0,084
52	0,173	0,168	0,224	0,160	0,152	0,176	0,148	0,144	0,168	0,192
79	0,343	0,377	0,392	0,352	0,336	0,380	0,328	0,352	0,316	0,424
128	0,800	1,196	0,828	1,328	0,804	1,148	0,804	1,256	0,764	1,052
155	1,034	1,683	1,048	1,972	1,040	1,516	1,048	1,832	1,000	1,412
184	1,261	2,183	1,248	2,588	1,296	1,940	1,288	2,452	1,212	1,752
219	1,529	2,741	1,444	3,164	1,584	2,404	1,600	3,244	1,488	2,152
267	1,851	3,425	1,760	4,116	1,948	2,964	1,844	3,876	1,852	2,744
340	2,238	4,186	2,008	4,920	2,372	3,468	2,308	5,032	2,264	3,324
433	2,594	4,936	2,344	5,828	2,756	4,052	2,656	5,964	2,620	3,900
525	2,841	5,458	2,608	6,508	3,024	4,536	2,836	6,452	2,896	4,336
555	2,901	5,595	2,660	6,656	3,060	4,608	2,912	6,664	2,972	4,452
632	2,999	5,785	2,728	6,832	3,100	4,720	3,016	6,884	3,152	4,704
735	3,038	5,903	2,756	6,944	3,100	4,788	3,064	7,016	3,232	4,864
856	3,077	5,992	2,792	7,020	3,128	4,868	3,100	7,092	3,288	4,988
958	3,096	6,043	2,816	7,088	3,144	4,896	3,104	7,140	3,320	5,048
1100	3,128	6,103	2,836	7,148	3,164	4,94	3,14	7,192	3,372	5,132

Tabell C-16: Alle ekspansjoner enkeltmålinger prisme P-Ø10-2

Døgn	Ø10-2- lengde	Ø10-2- tverr	Ø10-2- A- lengde	Ø10-2- A- tverr	Ø10-2- B- lengde	Ø10-2- B- tverr	Ø10-2- C- lengde	Ø10-2- C- tverr	Ø10-2- D- lengde	Ø10-2- D- tverr
24	0,042	0,056	0,072	0,076	0,052	0,024	0,028	0,052	0,016	0,072
52	0,124	0,160	0,168	0,160	0,152	0,180	0,088	0,136	0,088	0,164
79	0,295	0,356	0,372	0,344	0,368	0,476	0,232	0,260	0,208	0,344
128	0,889	1,148	1,076	1,156	1,052	1,432	0,712	0,940	0,716	1,064
155	1,185	1,650	1,432	1,592	1,336	1,992	0,960	1,424	1,012	1,592
184	1,461	2,138	1,760	2,088	1,604	2,524	1,180	1,872	1,300	2,068
219	1,748	2,646	2,004	2,448	1,908	3,088	1,504	2,516	1,576	2,532
267	2,055	3,235	2,320	3,132	2,152	3,496	1,740	3,032	2,008	3,280
340	2,497	4,014	2,824	3,972	2,664	4,404	2,096	3,640	2,404	4,040
433	2,937	4,701	3,312	4,692	3,048	5,048	2,468	4,320	2,920	4,744
525	3,252	5,250	3,576	5,116	3,392	5,564	2,808	5,188	3,232	5,132
555	3,340	5,404	3,708	5,364	3,444	5,652	2,852	5,320	3,356	5,280
632	3,565	5,806	3,840	5,572	3,600	5,760	3,120	6,104	3,700	5,788
735	3,645	5,983	3,964	5,816	3,692	5,896	3,144	6,308	3,780	5,912
856	3,692	6,142	4,000	5,876	3,784	6,040	3,152	6,620	3,832	6,032
958	3,703	6,201	3,996	5,888	3,816	6,112	3,144	6,708	3,856	6,096
1100	3,746	6,286	4,024	5,924	3,872	6,18	3,172	6,888	3,916	6,152

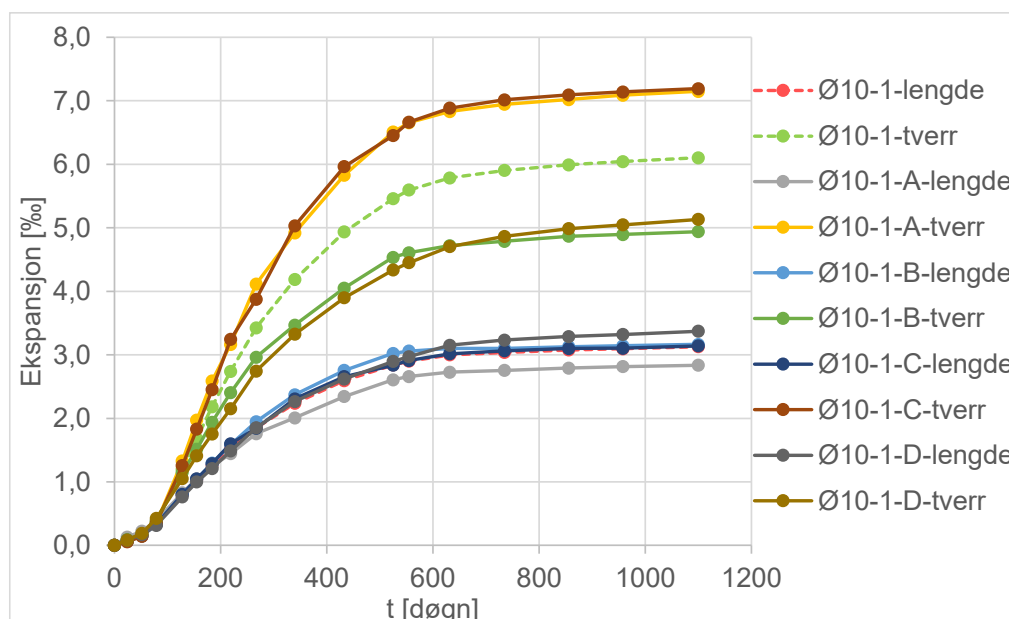
Middel:

Figur C-1351: Middelverdier i lengde- og tverretning P-ø10-1 og P-ø10-2



Figur C-1452: Middelverdier i lengde- og tverretning P-ø10-1 og P-ø10-2 frem til 200 døgn

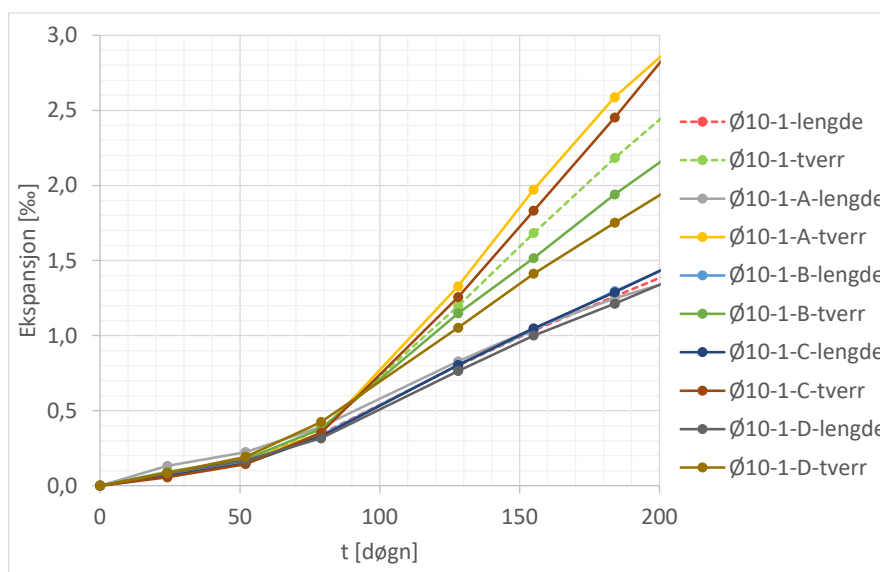
P- Ø10-1:



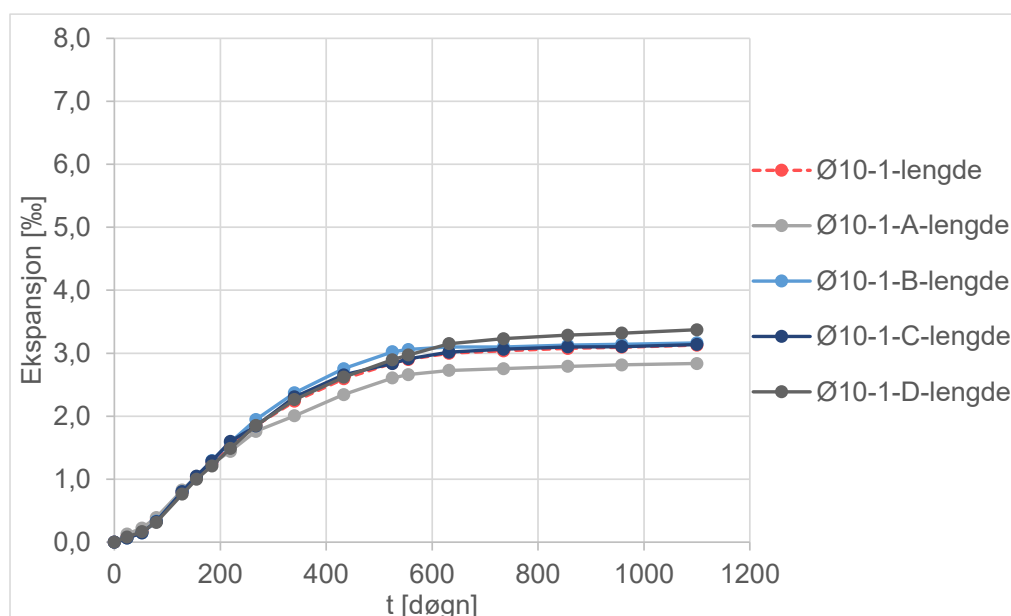
Figur C-1553: Ekspansjoner alle enkeltmålinger prisme P-Ø10-1

Her er det spesielt at flate A og flate C utvider seg mye mer på tvers enn flate B og flate D. Etter hvert blir forskjellen ca. 2 ‰, som er 0,4 mm over målelengden på 200 mm. Denne utviklingen starter allerede ved en tøying på ca. 0,5 ‰ og holder seg ganske stabil innbyrdes mellom målingene ved økende tøying og spenning og kraft i armeringen. Dette tyder på at det ikke har noe med lasten på prøven fra armeringen å gjøre. Årsaken er derfor sannsynligvis at denne prøven ekspanderer mer på tvers i A-C retningen enn i B-D retningen. Denne forskjellen kan i dette tilfellet være ganske lokal ved målepunktene.

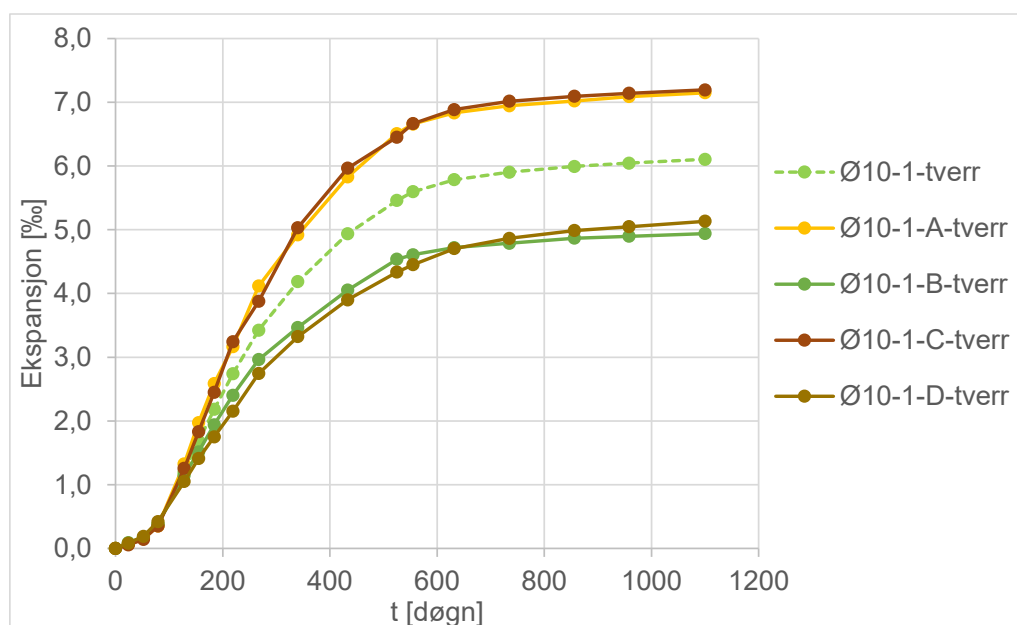
Tøyningen i lengderetningen er ganske jevn med unntak av flate A som er litt mindre enn de andre. I starten er flate A minst og flate B størst, men etter hvert blir flate D størst. Det er derfor ingen tydelig bøyningsakse for denne prøven. Det kan skyldes flere forhold. Enten at stålplatene ikke er stive nok til å holde tøyningfordelingen plan eller at fordelingen av ekspansjonen i lengderetningen er forskjellig i hver ende og at platene da ikke orienterer seg helt likt. Kanskje et svar på dette fra noen av de andre armerte prøvene. Det er heller ikke noe tydelig forhold eller sammenheng mellom tverr- og lengdetøyningene for denne prøven. F.eks. har flate A størst tverr-tøying og minst lengdetøying.



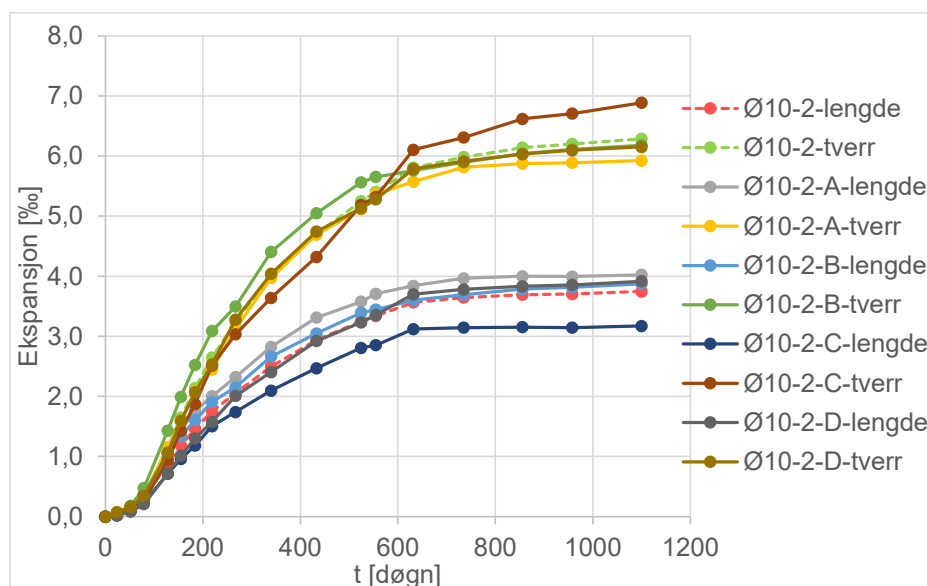
Figur C-1654: Ekspansjoner alle enkeltmålinger prisme P-Ø10-1 frem til 200 døgn



Figur C-1755: Ekspansjoner enkeltmålinger i lengderetning prisme P-ø10-1



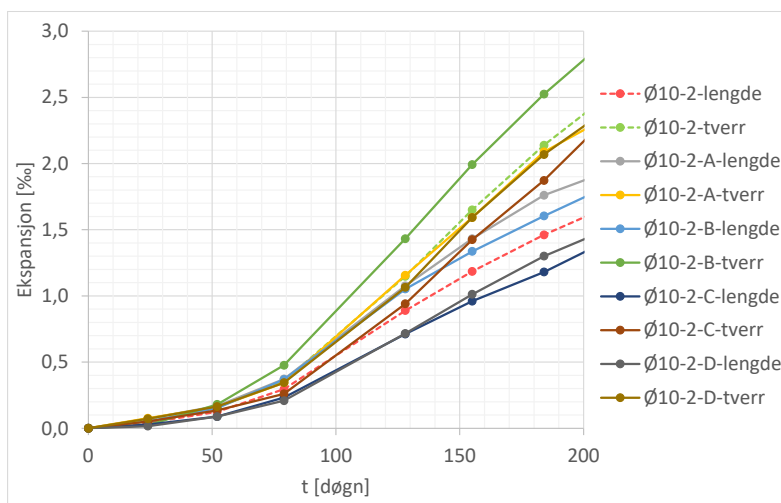
Figur C-18: Ekspansjoner enkeltmålinger i tverretning prisme P-ø10-1

P- Ø10-2:

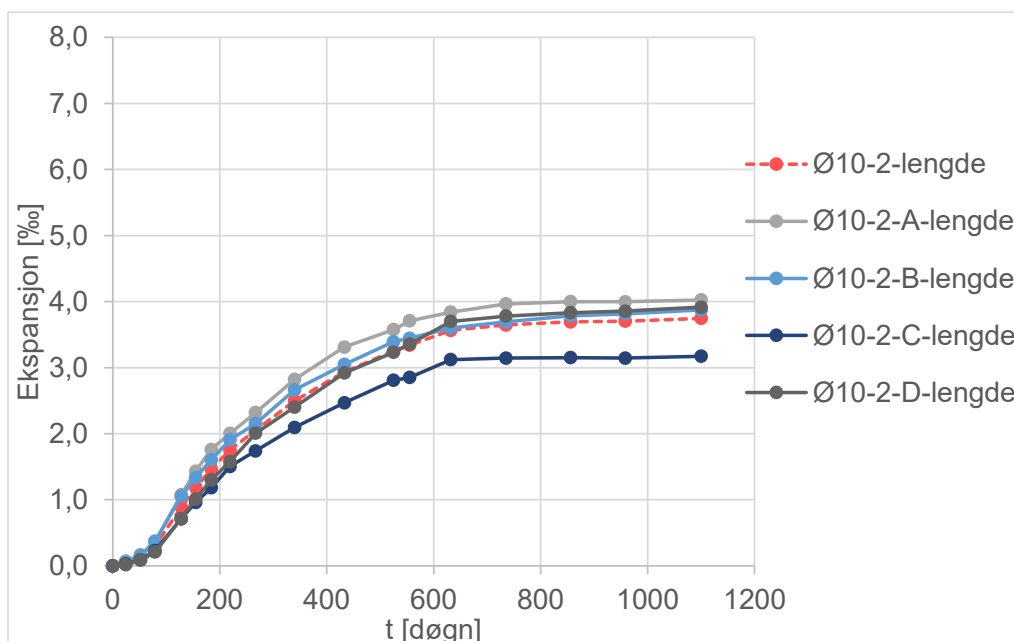
Figur C-1956: Ekspansjoner alle enkeltmålinger prisme P-Ø10-2

Her er ekspansjonen ganske lik i tverr-retningen på alle flatene, men går over fra å være minst i starten på flate C til å bli størst etter ca. 600 døgn. Fra da av er den da størst i tverr-retningen og minst i lengderetningen på den flaten. Det er også litt spesielt at lengdetøyningen på denne flaten flater helt ut etter ca. 600 døgn. Den gjør det etter hvert også på flate A, som har størst lengdetøyning.

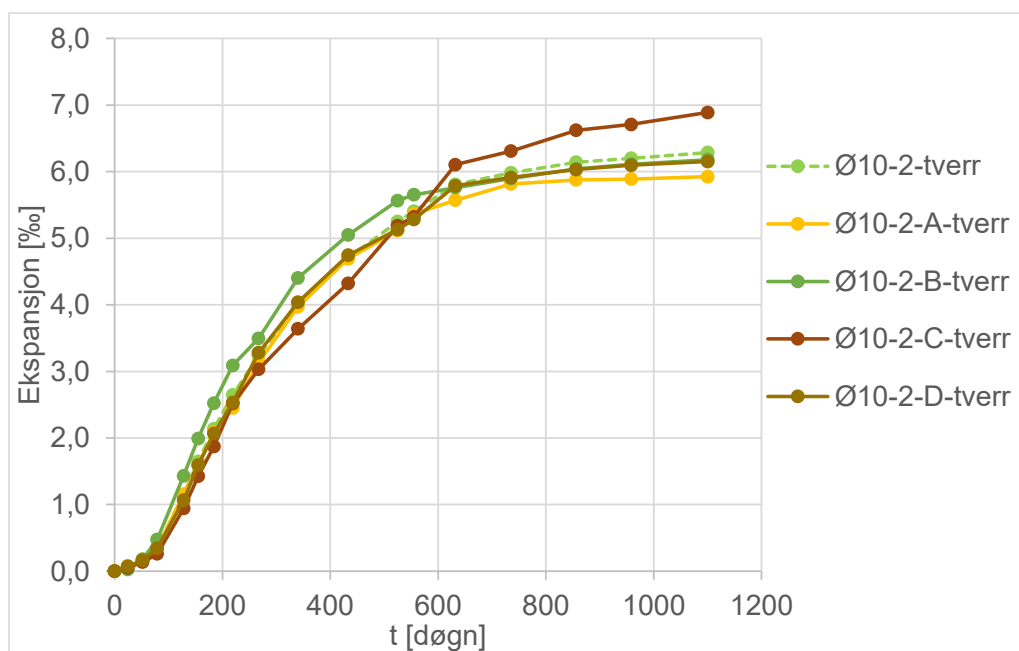
I begynnelsen, opp til en ekspansjon på ca. 2 %, er lengdetøyningen størst og ganske lik på flate A og flate B og minst og ganske lik på flate C og flate D. Det stemmer med en bøyning om en akse gjennom hjørne A-D og hjørne B-C. Flate B og D samler seg så mer, men med flate A størst og flate C som klart minst. Det stemmer for så vidt med en bøyning om en akse parallell med flate A og flate C, men flate C er for mye mindre enn de andre målingene til at dette stemmer helt. Etter hvert samler også målingene på flate A, B og D seg ganske tett, med måling C som klart lavest. Ekspansjonen på tvers fortsetter imidlertid å øke i dette området, og da mest på flate C. Det er derfor litt uklart hva disse nærmest horisontale plattåene for lengdetøyningen mot slutten av ekspansjonsforløpet skyldes. Hvis denne tendensen er riktig og det fortsatt er en ekspansjon på flate A og flate C, må det skyldes at kreftene i stengene er litt forskjellige i de to endene og at eksentrisiteten i en retning i den ene enden oppveies av en motsatt eksentrisitet i den andre enden. I dette tilfellet må det eventuelt være en slik effekt på tvers mellom flate A og flate C. Vi må imidlertid vurdere litt nærmere om dette er mulig og hva som da evt. skjer internt i prøven.



Figur C-2057: Ekspansjoner alle enkeltmålinger prisme P-Ø10-2 frem til 200 døgn



Figur C-2158: Ekspansjoner enkeltmålinger i lengderetning prisme P-ø10-2



Figur C-2259: Ekspansjoner enkeltmålinger i tverretning prisme P-ø10-2

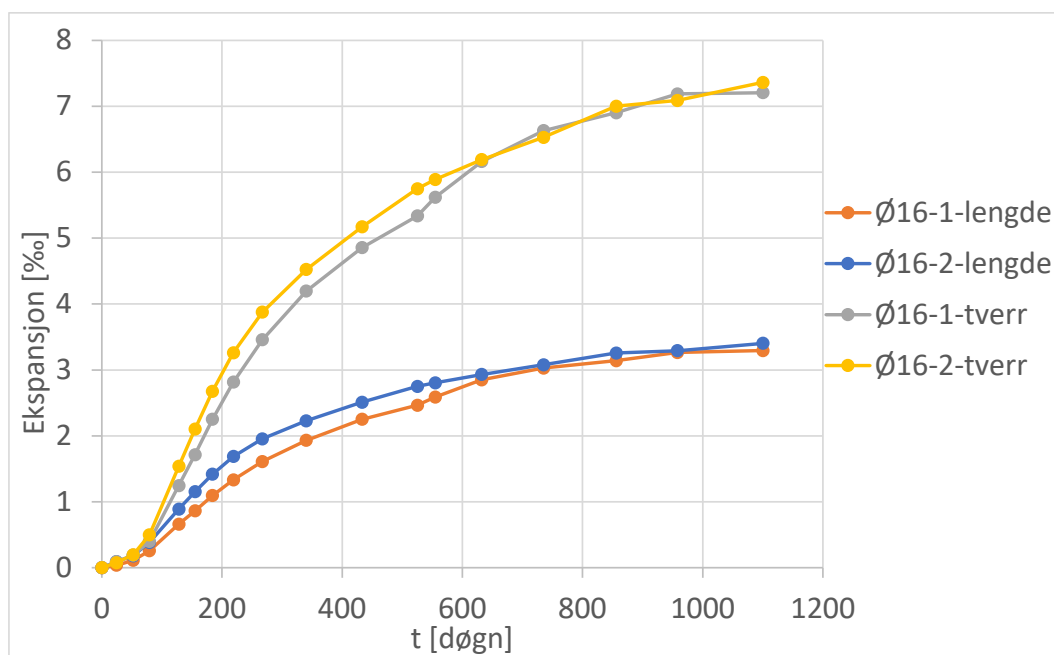
C.3: Prismer med 4Ø16 mm stenger; P-Ø16-1 og P-Ø16-2

Tabell C-17: Alle ekspansjoner enkeltmålinger prisme P-Ø16-1

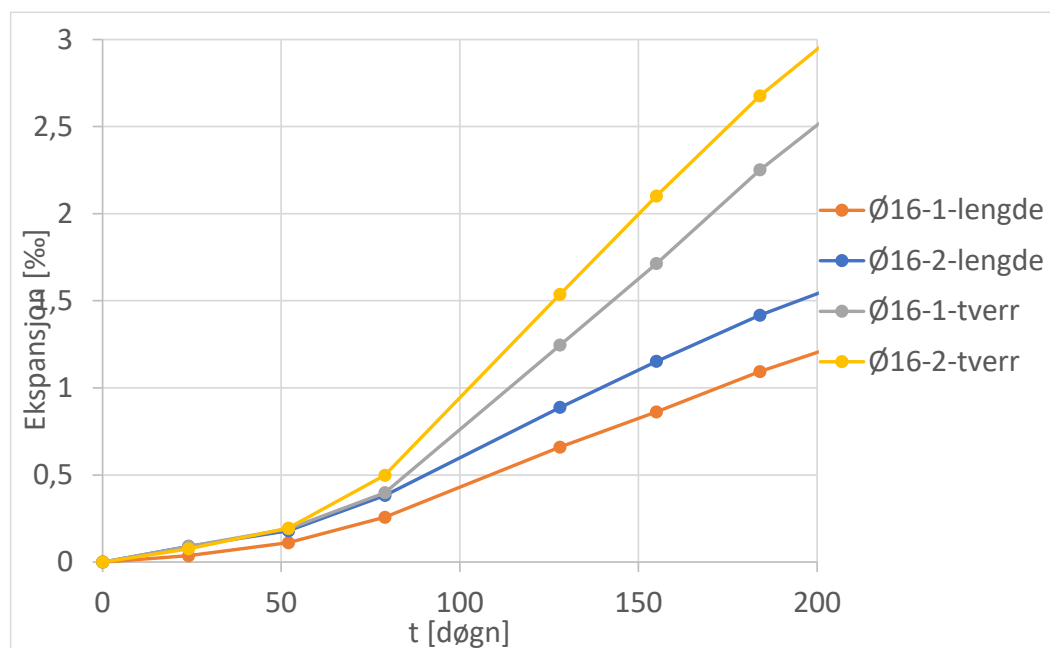
Døgn	ø16-1- lengde	ø16-1- tverr	ø16-1- A- lengde	ø16-1- A- tverr	ø16-1- B- lengde	ø16-1- B- tverr	ø16-1- C- lengde	ø16-1- C- tverr	ø16-1- D- lengde	ø16-1- D- tverr
24	0,036	0,090	0,104	0,088	-0,016	0,064	0,008	0,092	0,048	0,116
52	0,111	0,191	0,204	0,196	0,040	0,160	0,076	0,196	0,124	0,212
79	0,257	0,398	0,364	0,380	0,176	0,388	0,232	0,480	0,256	0,344
128	0,660	1,245	0,764	1,304	0,540	1,260	0,676	1,532	0,660	0,884
155	0,862	1,713	0,988	1,780	0,692	1,680	0,916	2,136	0,852	1,256
184	1,094	2,251	1,220	2,420	0,880	2,064	1,184	2,864	1,092	1,656
219	1,333	2,814	1,424	2,988	1,076	2,472	1,504	3,692	1,328	2,104
267	1,610	3,458	1,660	3,564	1,268	2,796	1,872	4,832	1,640	2,640
340	1,932	4,196	2,000	4,380	1,468	3,084	2,336	6,064	1,924	3,256
433	2,252	4,854	2,328	5,056	1,732	3,456	2,780	7,104	2,168	3,800
525	2,464	5,336	2,708	5,980	1,940	3,860	2,852	7,220	2,356	4,284
555	2,589	5,621	2,824	6,304	2,072	4,056	3,012	7,592	2,448	4,532
632	2,851	6,162	2,992	6,724	2,252	4,364	3,480	8,520	2,680	5,040
735	3,028	6,630	3,224	7,396	2,372	4,648	3,688	8,980	2,828	5,496
856	3,140	6,901	3,320	7,648	2,460	4,844	3,848	9,312	2,932	5,800
958	3,265	7,188	3,504	8,120	2,552	5,032	3,964	9,576	3,040	6,024
1100	3,294	7,251	3,532	8,196	2,568	5,092	4,000	9,644	3,076	6,072

Tabell C-18: Alle ekspansjoner enkeltmålinger prisme P-Ø16-2

Døgn	ø16-2- lengde	ø16-2- tverr	ø16-2- A- lengde	ø16-2- A- tverr	ø16-2- B- lengde	ø16-2- B- tverr	ø16-2- C- lengde	ø16-2- C- tverr	ø16-2- D- lengde	ø10-2- D- tverr
24	0,090	0,076	0,112	0,080	0,108	0,076	0,060	0,064	0,080	0,084
52	0,179	0,195	0,212	0,192	0,172	0,184	0,164	0,196	0,168	0,208
79	0,382	0,498	0,424	0,496	0,388	0,452	0,384	0,584	0,332	0,460
128	0,888	1,537	1,016	1,720	0,916	1,424	0,888	1,768	0,732	1,236
155	1,152	2,101	1,348	2,352	1,164	1,936	1,152	2,392	0,944	1,724
184	1,417	2,677	1,648	2,988	1,420	2,476	1,452	2,996	1,148	2,248
219	1,687	3,260	1,932	3,680	1,660	2,900	1,780	3,692	1,376	2,768
267	1,955	3,876	2,212	4,520	1,888	3,392	2,092	4,364	1,628	3,228
340	2,229	4,523	2,428	5,160	2,180	3,976	2,464	5,260	1,844	3,696
433	2,511	5,171	2,788	6,200	2,380	4,300	2,748	6,012	2,128	4,172
525	2,751	5,748	3,056	6,856	2,584	4,840	2,980	6,608	2,384	4,688
555	2,805	5,889	3,112	6,988	2,628	4,936	3,028	6,772	2,452	4,860
632	2,930	6,191	3,300	7,424	2,720	5,316	3,108	6,876	2,592	5,148
735	3,079	6,528	3,524	7,940	2,860	5,624	3,172	7,052	2,760	5,496
856	3,256	7,001	3,712	8,404	3,068	6,240	3,328	7,508	2,916	5,852
958	3,291	7,087	3,744	8,488	3,092	6,340	3,372	7,588	2,956	5,932
1100	3,404	7,362	3,828	8,708	3,180	6,576	3,484	7,840	3,124	6,324

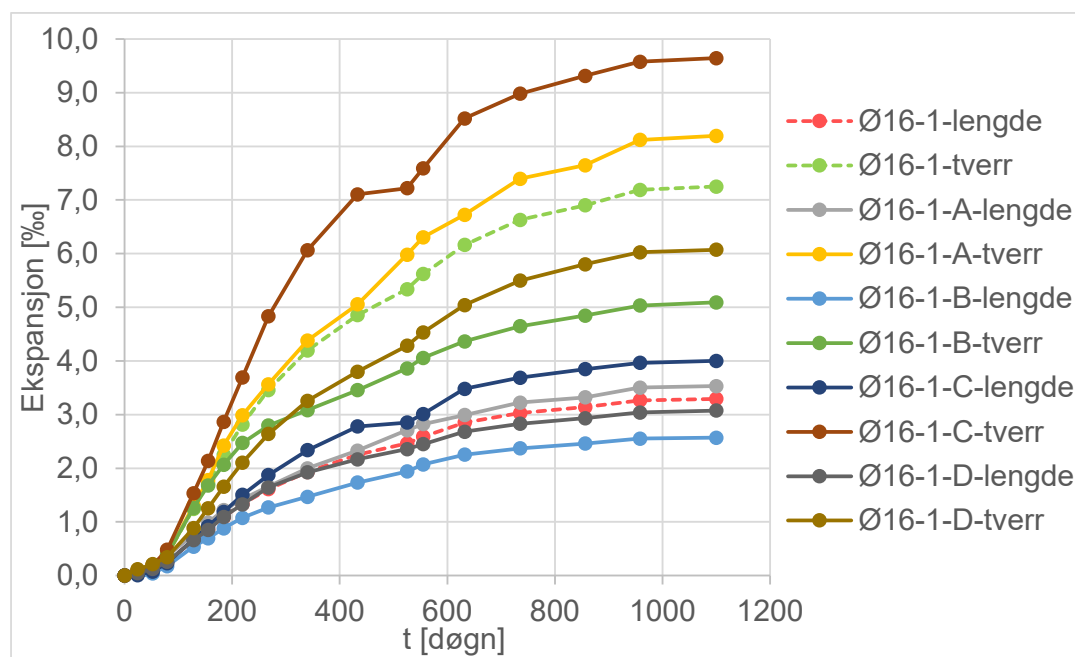
Middel:

Figur C-23: Middelverdier i lengde- og tverretning P-ø16-1 og P-ø16-2



Figur C-2460: Middelverdier i lengde- og tverretning P-ø16-1 og P-ø16-2 frem til 200 døgn

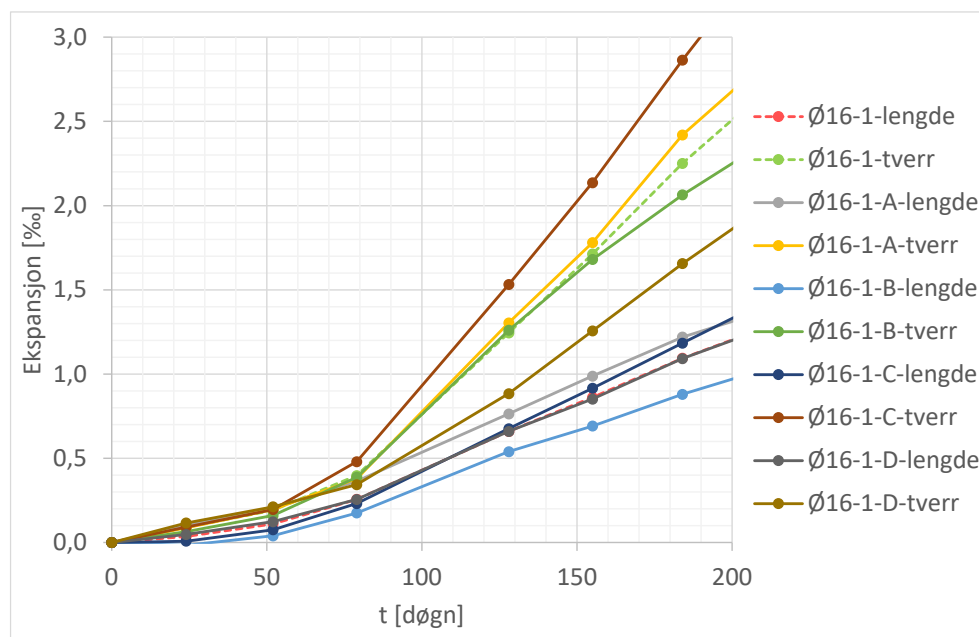
Disse prøvene er ganske like, med litt mindre ekspansjon i prøve 1 enn i prøve 2, bortsett fra helt mot slutten, fra 600 døgn og utover, da de er så godt som helt like.

P-Ø16-1:

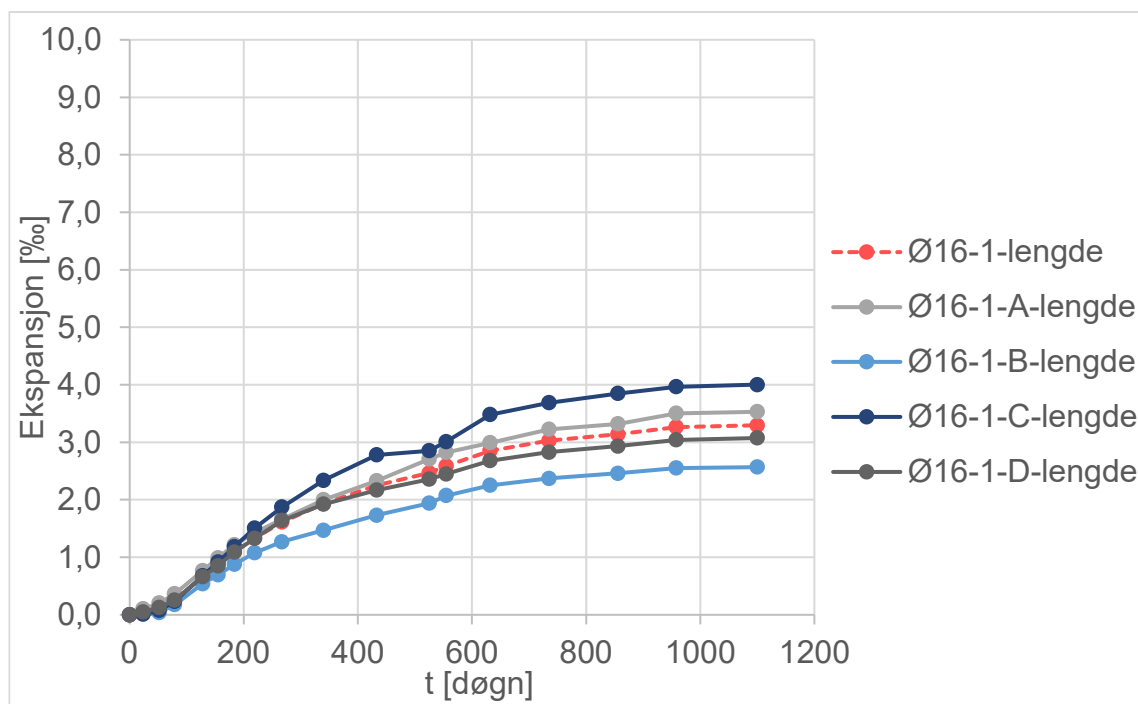
Figur C-2561: Ekspansjoner alle enkeltmålinger prisme P-Ø16-1

I dette tilfellet er det stor spredning på tverr-tøyningene. Utviklingen er ganske lik helt fra starten med størst tøyning på flate C og minst på flate D, men etter hvert endrer forholdet mellom flate B og flate D seg litt – slik at flate B får minst tøyning. Til slutt er forskjellen mellom flate B og flate C ca. 4,5 ‰.

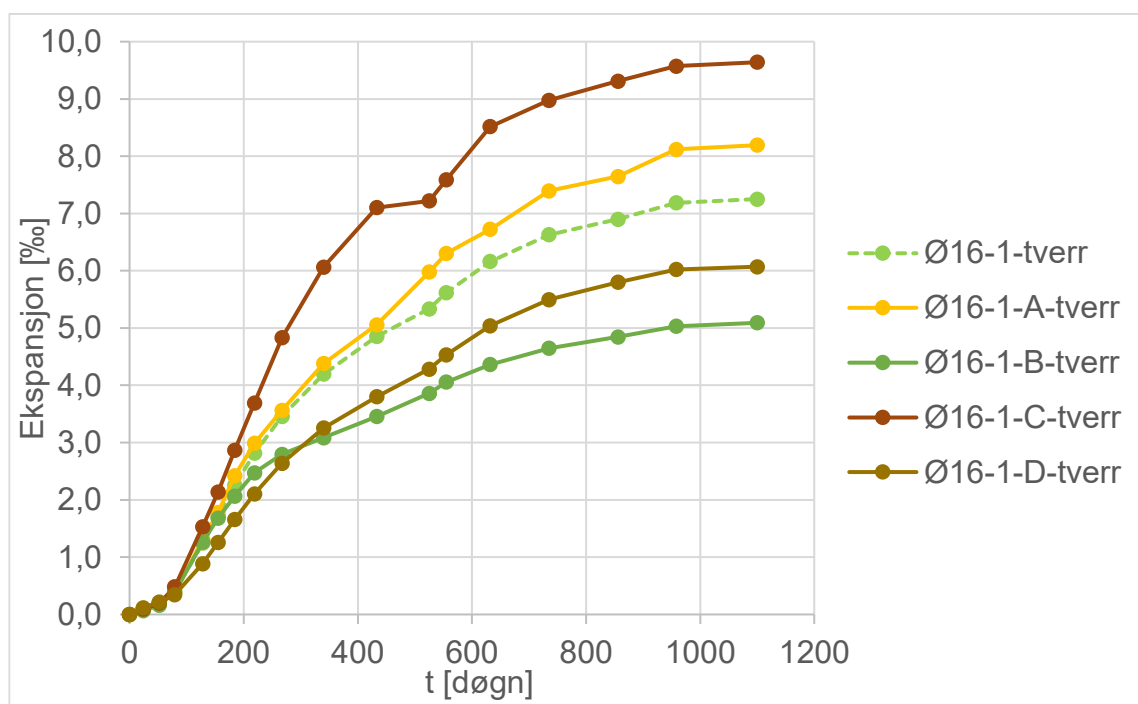
Det er også ganske stor spredning for målingene i lengderetningen for dette prismet. Forskjellen øker med ekspansjonen og til slutt er den ca. 1,5 ‰ ved en midlere ekspansjon på ca. 3,0 ‰. Flate B viser hele tiden minst ekspansjon i lengderetningen og flate C mest. Flate A og flate D ligger omtrent midt imellom flate B og flate C. Det er derfor heller ikke noe tydelig bøyepå for denne prøven. Vi må se litt nærmere på hva denne spredningen kan skyldes.



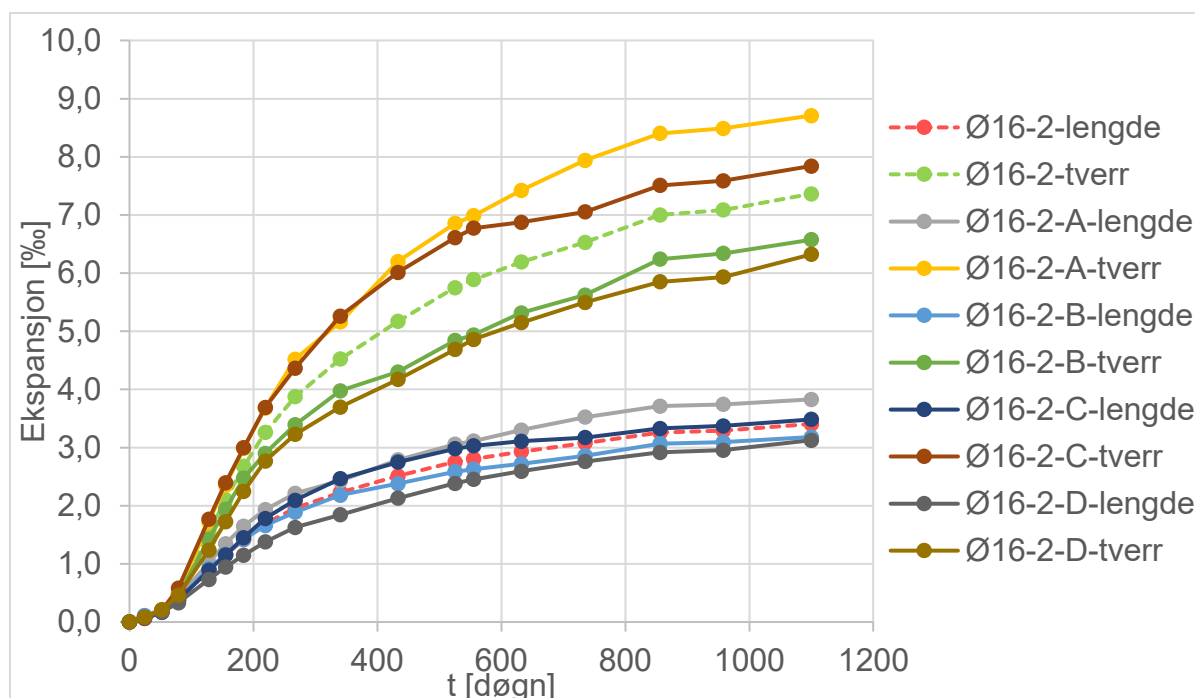
Figur C-26: Ekspansjoner alle enkeltmålinger prisme P-Ø16-1 frem til 200 døgn



Figur C-27: Ekspansjoner enkeltmålinger i lengderetning prisme P-ø16-1



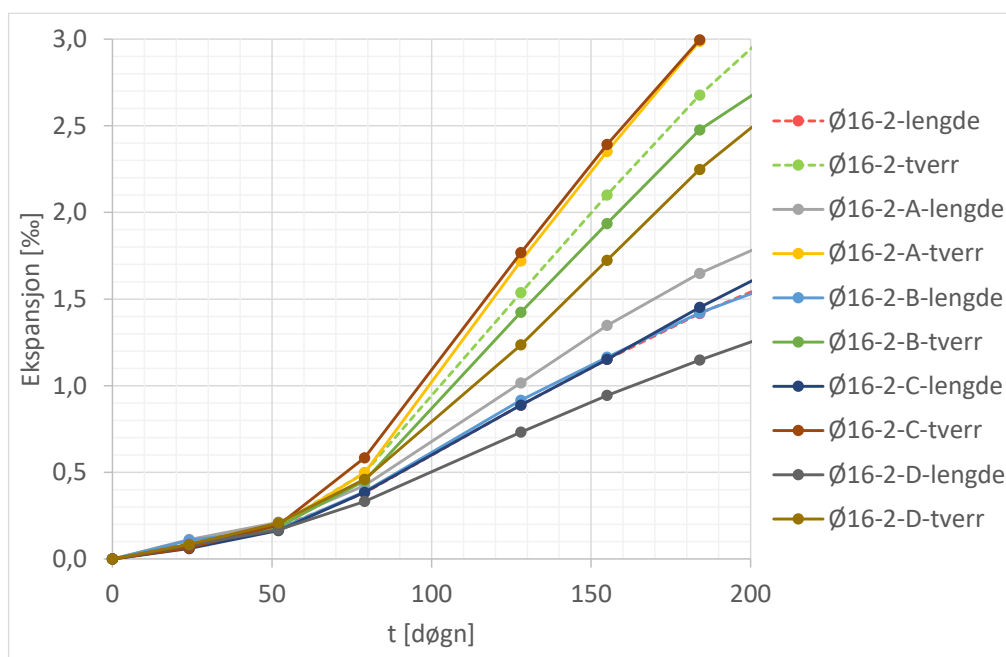
Figur C-28: Ekspansjoner enkeltmålinger i tverretning prisme P-ø16-1

P-Ø16-2:

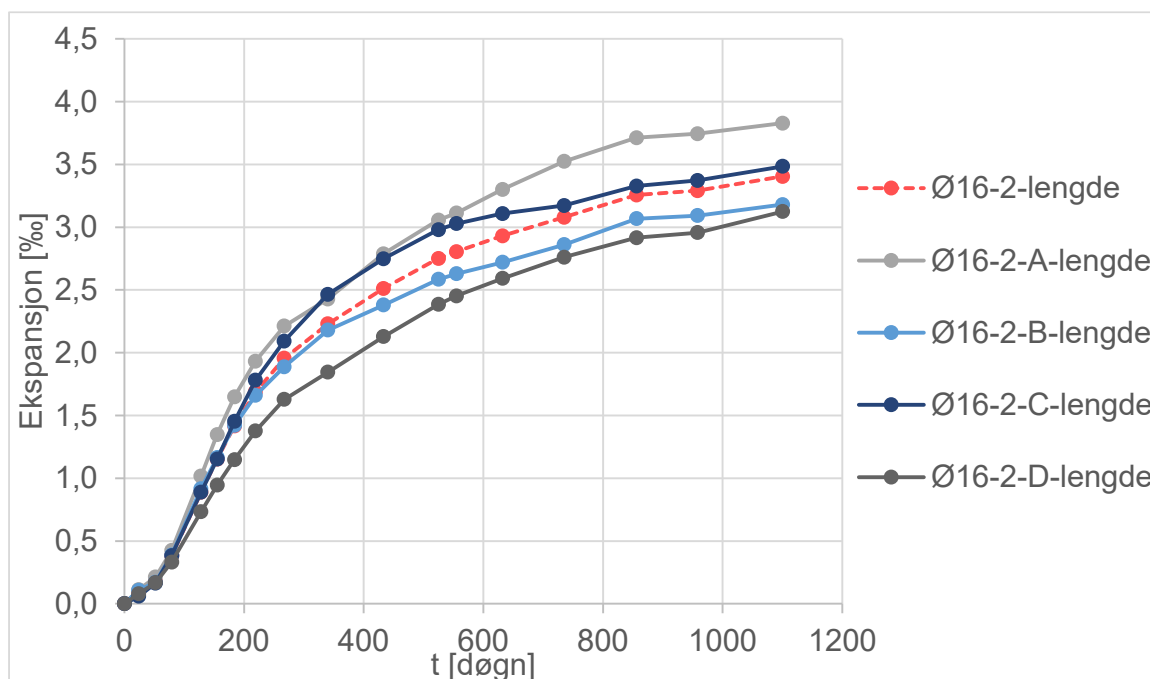
Figur C-29: Ekspansjoner alle enkeltmålinger prisme P-Ø16-2

Denne prøven har også størst tverr-tøyning på flate A og flate C og mindre på flate B og flate D. Flatene med mest og minst tøyning følger hverandre ganske godt i starten opp til ca. 600 døgn, da flate C begynner å avta noe. Da avtar også samtidig tøyningen i lengderetningen på denne flaten.

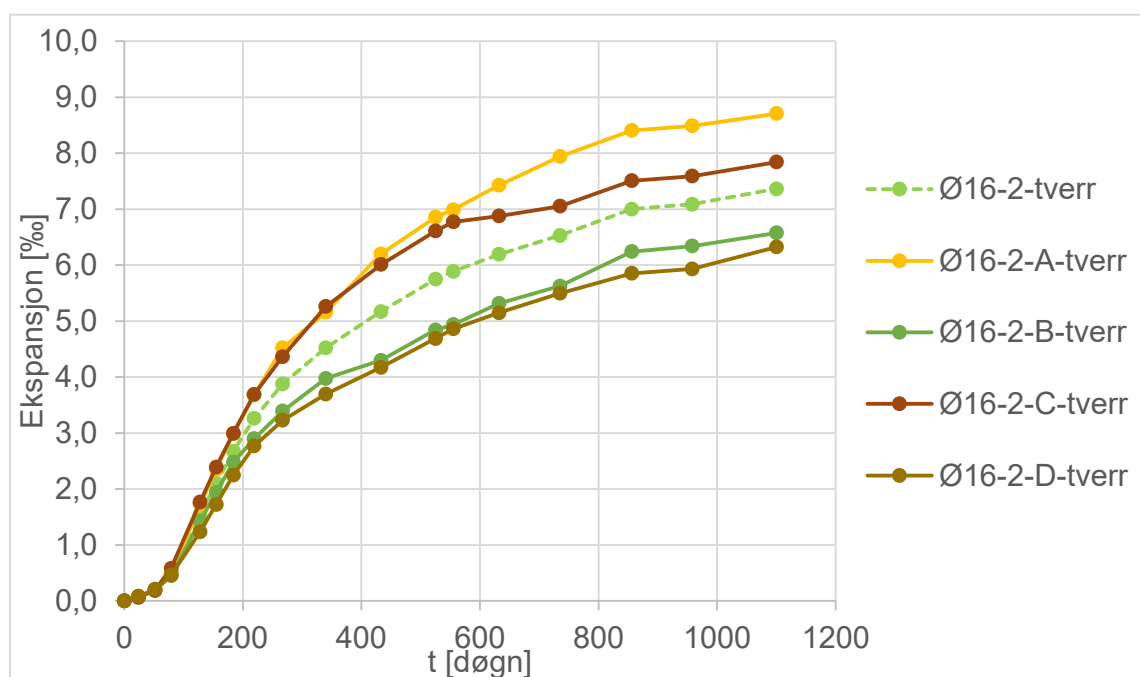
I lengderetningen har først flate A størst ekspansjon og flate D minst, med de to andre flatene noenlunde midt imellom disse verdiene. Etter hvert øker imidlertid flate D til å bli like stor som flate A, mens flate B fortsatt holder seg noenlunde i midten. Fra ca. 600 døgn avtar flate D igjen og går mot midten samtidig som flate B også nærmer seg flate D, som hele tiden er nederst. Det er noe i lengderetningen som vi enda ikke forstår.



Figur C-30: Ekspansjoner alle enkeltmålinger prisme P-Ø16-2 frem til 200 døgn



Figur C-3162: Ekspansjoner enkeltmålinger i lengderetning prisme P-ø16-2



Figur C-32: Ekspansjoner enkeltmålinger i tverretning prisme P-ø16-2

C.4: Middelverdier

Middelverdier av de ulike prøvetypene i lengde og tverretning. Middel av 8 målinger.

Tabell C-19: Middelverdier for prismer P-UA-lengde og tverr med Standaravvik og var.koeff %

Døgn	P-UA-lengde	Std.dev	Var coff %	P-UA-tverr	Stddev	Var coff %
24	0,043	0,029	66,5	0,040	0,025	63,5
52	0,107	0,041	38,9	0,134	0,032	23,9
79	0,332	0,068	20,4	0,365	0,080	22,0
128	1,026	0,135	13,2	1,145	0,241	21,1
155	1,413	0,174	12,3	1,600	0,324	20,3
184	1,751	0,263	15,0	1,955	0,335	17,1
219	2,178	0,390	17,9	2,429	0,471	19,4
267	2,628	0,510	19,4	2,879	0,538	18,7
340	3,091	0,607	19,6	3,350	0,649	19,4
433	3,623	0,641	17,7	3,879	0,767	19,8
525	3,960	0,603	15,2	4,205	0,755	18,0
555	4,079	0,653	16,0	4,318	0,758	17,5
632	4,429	0,709	16,0	4,623	0,743	16,1
735	4,658	0,791	17,0	4,852	0,744	15,3
856	4,986	0,851	17,1	5,135	0,752	14,6
958	5,207	0,867	16,7	5,396	0,762	14,1
1100	5,305	0,870	16,4	5,495	0,746	13,6

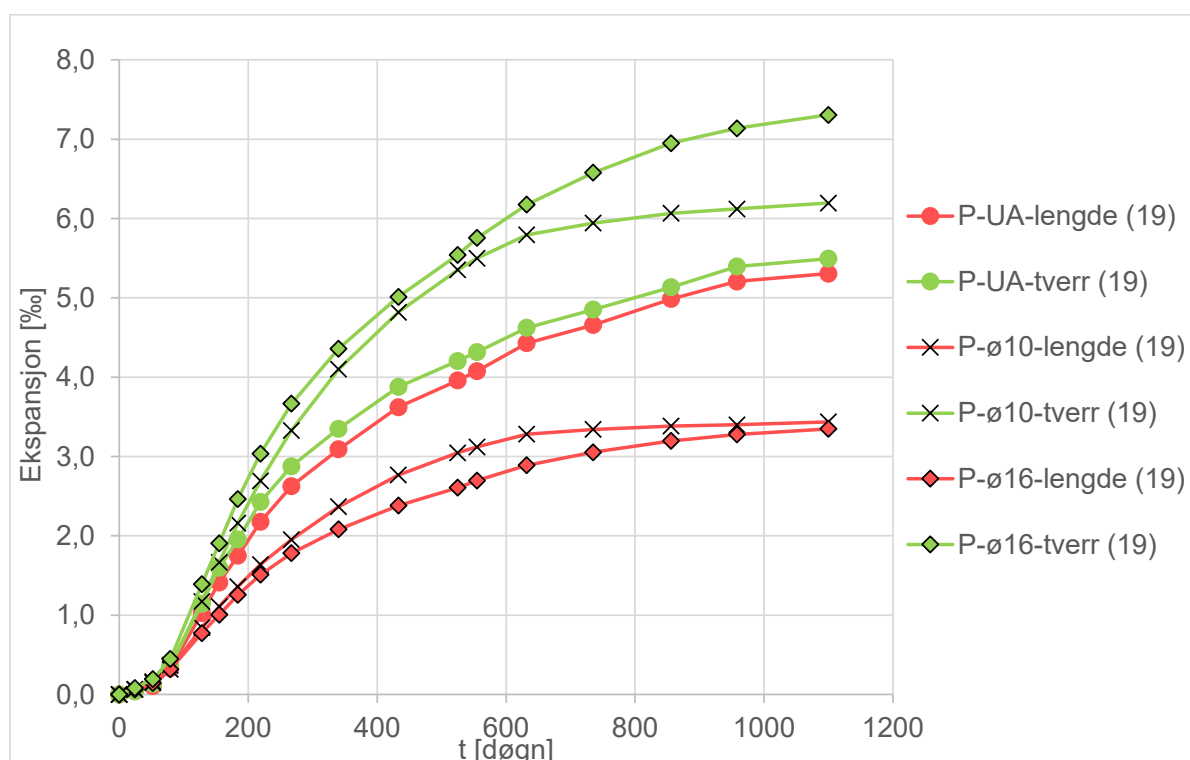
Tabell C-20: Middelverdier for prismer P-Ø10-lengde og tverr med Standaravvik og var.koeff %

Døgn	P-Ø10-lengde	Std.dev	Var coff %	P-Ø10-tverr	Stddev	Var coff %
24	0,065	0,036	54,8	0,065	0,021	32,9
52	0,149	0,044	29,9	0,164	0,019	11,3
79	0,319	0,066	20,8	0,367	0,064	17,3
128	0,845	0,142	16,8	1,172	0,160	13,7
155	1,110	0,174	15,7	1,667	0,234	14,1
184	1,361	0,207	15,2	2,161	0,319	14,8
219	1,639	0,205	12,5	2,694	0,410	15,2
267	1,953	0,201	10,3	3,330	0,471	14,1
340	2,368	0,271	11,5	4,100	0,640	15,6
433	2,766	0,317	11,4	4,819	0,764	15,9
525	3,047	0,327	10,7	5,354	0,795	14,8
555	3,121	0,350	11,2	5,500	0,820	14,9
632	3,282	0,386	11,8	5,796	0,824	14,2
735	3,342	0,419	12,6	5,943	0,828	13,9
856	3,385	0,431	12,7	6,067	0,837	13,8
958	3,400	0,431	12,7	6,122	0,847	13,8
1100	3,437	0,441	12,8	6,195	0,859	13,9

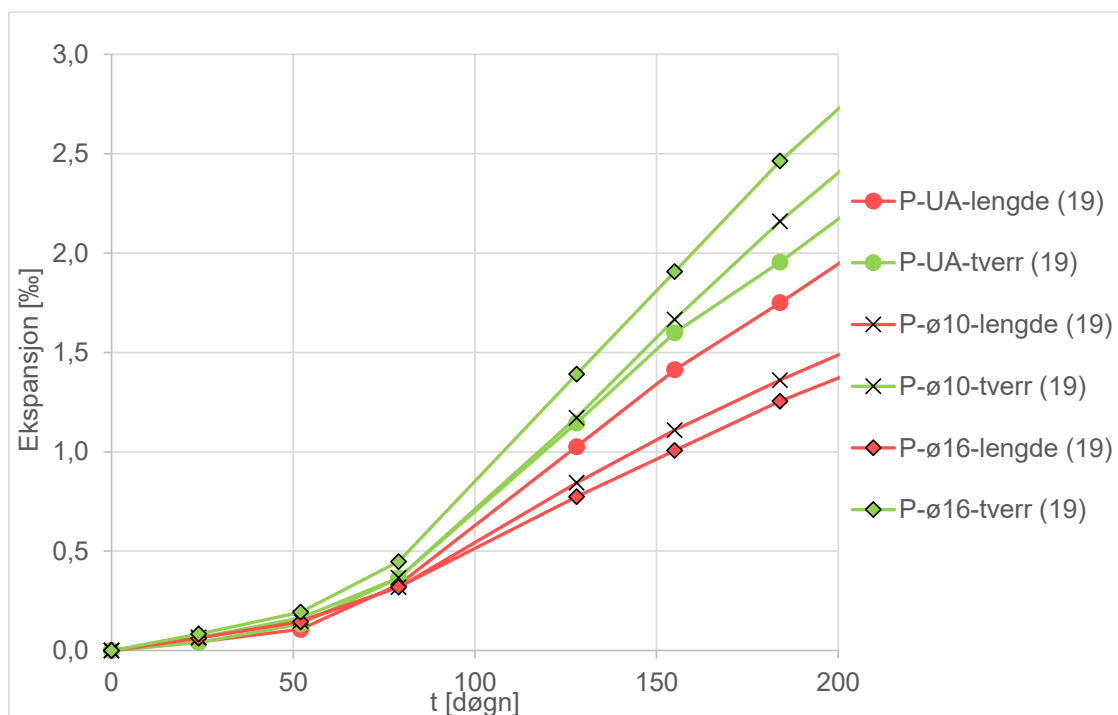
Tabell C-21: Middelverdier for prismer P-ø16-lengde og tverr med Standaravvik og var.koeff %

Døgn	P-Ø16-lengde	Stddev	Var coff %	P-Ø16-tverr	Stddev	Var coff %
24	0,063	0,048	75,6	0,083	0,017	20,2
52	0,145	0,061	41,9	0,193	0,016	8,30
79	0,320	0,088	27,5	0,448	0,077	17,1
128	0,774	0,156	20,2	1,391	0,287	20,6
155	1,007	0,206	20,5	1,907	0,380	19,9
184	1,256	0,241	19,2	2,464	0,475	19,3
219	1,510	0,273	18,1	3,037	0,604	19,9
267	1,783	0,298	16,7	3,667	0,816	22,3
340	2,081	0,339	16,3	4,360	1,055	24,2
433	2,382	0,377	15,8	5,013	1,303	26,0
525	2,608	0,372	14,3	5,542	1,282	23,1
555	2,697	0,361	13,4	5,755	1,314	22,8
632	2,891	0,404	14,0	6,177	1,425	23,1
735	3,054	0,432	14,1	6,579	1,488	22,6
856	3,198	0,452	14,1	6,951	1,510	21,7
958	3,278	0,458	14,0	7,138	1,545	21,6
1100	3,349	0,458	13,7	7,307	1,532	21,0

Ser at standardavviket og variasjonskoeffisienten er noe mindre i lengderetning for de armerte prismene enn i de frie retningene.



Figur C-33: Ekspansjoner middelverdier P-UA, P-ø10 og P-ø16 i lengde- og tverretning



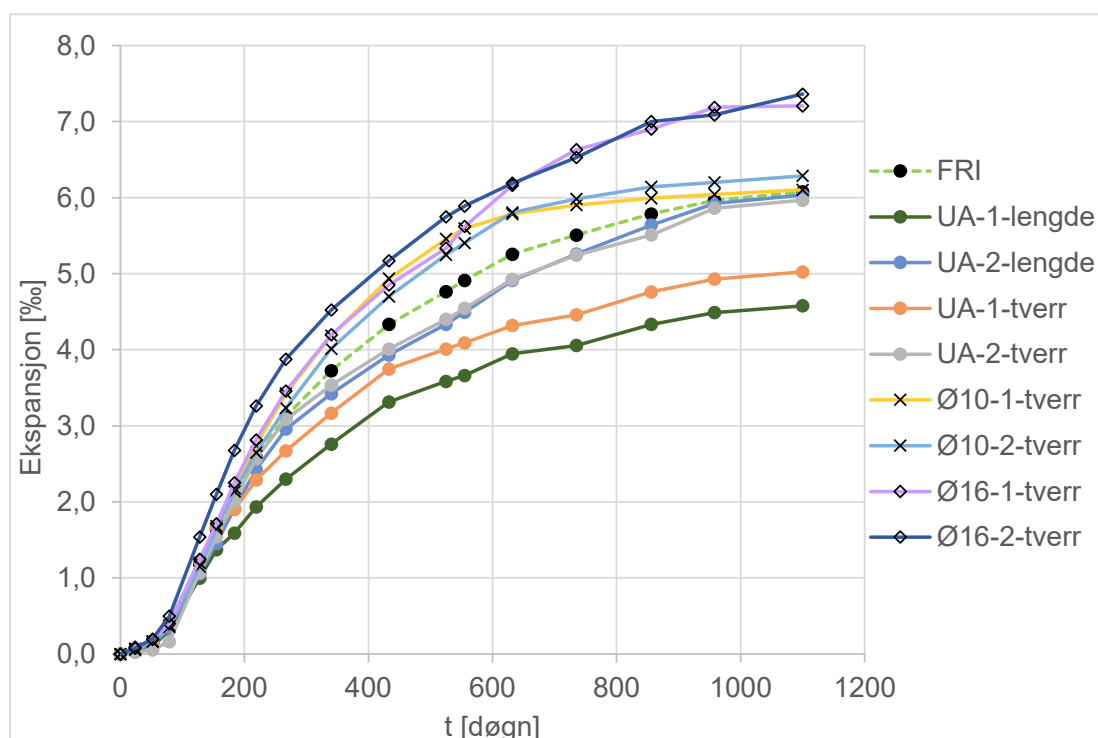
Figur C-34: Ekspansjoner middelerverdier P-UA, P-ø10 og P-ø16 i lengde- og tverretning

C.5: Fri ekspansjon

Middelverdien av 32 målinger. Alle retninger av prismene P-UA-1 og P-UA-2 og tverretningene til prismene P-ø10-1, P-ø10-2, P-ø16-1 og P-ø16-2. Verdi fastholdt/Fri, standardavviket og variasjonskoeffisienten for den fri ekspansjon er vist i Tabell C-10.

Tabell C-22: Fri ekspansjon, standardavvik, variasjonskoeffisient og forhold Fastholdt/Fri ekspansjon

Døgn	FRI	Stdtddev	Var.coff	Fastholdt/Fri (ø10)	Fastholdt/Fri (ø16)
24	0,058	0,029	49,4	1,126	1,091
52	0,149	0,043	28,7	0,995	0,972
79	0,378	0,081	21,5	0,844	0,846
128	1,184	0,244	20,6	0,714	0,654
155	1,647	0,328	19,9	0,674	0,612
184	2,083	0,432	20,7	0,654	0,603
219	2,584	0,556	21,5	0,634	0,584
267	3,126	0,700	22,4	0,625	0,570
340	3,725	0,896	24,0	0,636	0,559
433	4,333	1,051	24,2	0,638	0,550
525	4,765	1,104	23,2	0,639	0,547
555	4,913	1,145	23,3	0,635	0,549
632	5,256	1,193	22,7	0,624	0,550
735	5,508	1,250	22,7	0,607	0,554
856	5,785	1,269	21,9	0,585	0,553
958	5,965	1,263	21,2	0,570	0,549
1100	6,075	1,276	21,0	0,566	0,551



Figur C-35: Referanse fri retning for prismene fra 2019 markert med grønn stiplet linje. Middelverdiene til hvert prisme i hver fri retning også vist.

C.6: Bilder

P-UA-1:



a) Side A



b) Side B



c) Side C



d) Side D

Figur C-36: P-UA-1 (19)

P-UA-2:



a) Side A



b) Side B



c) Side C



d) Side D

Figur C-37: P-UA-2 (19)

P-Ø10-1:



a) Side A



b) Side B



c) Side C



d) Side D

Figur C-38: P-Ø10-1 (19)

P-ø10-2:



a) Side A



b) Side B



c) Side C



d) Side D

Figur C-39: P-Ø10-2

P-Ø16-1:



a) Side A



b) Side B



c) Side C



d) Side D

Figur C-40: PØ16-1

P-Ø16-2:



a) Side A



b) Side B



c) Side C



d) Side D

Figur C-41: P-Ø16-2

VEDLEGG D: ENKELTMÅLINGER PRISMER 2020

Alle målinger er her ved 38°C. Alle tøyninger er oppgitt i ‰.

D.1: Uarmert prisme; P-UA

Tabell D-23: Alle enkeltmålinger prisme P-UA i lengderetning, middelerdi, standardavvik og var. koeff

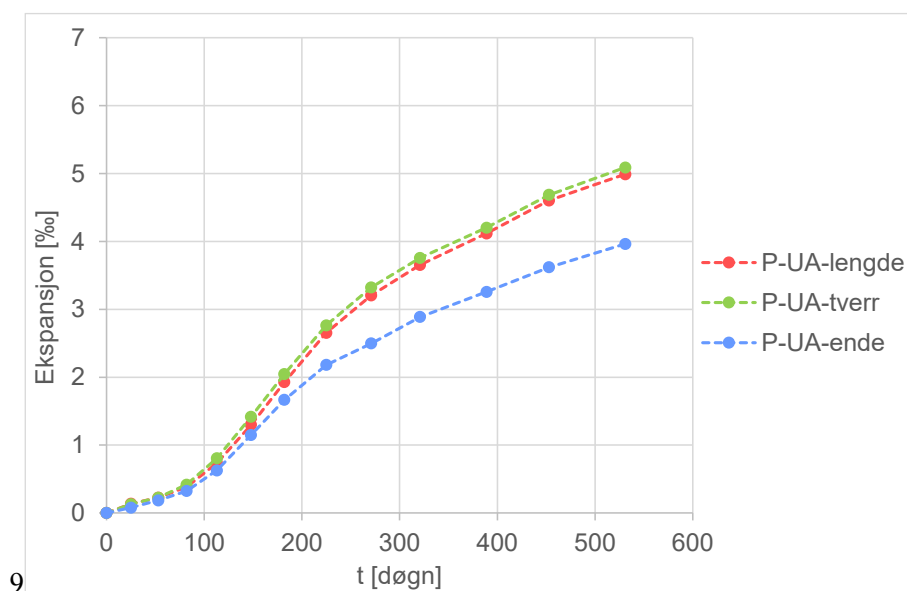
Døgn	P-UA-lengde-A	P-UA-lengde-B	P-UA-lengde-C	P-UA-lengde-D	P-UA-lengde	Std.dev	Var coff %
25	0,132	0,100	0,152	0,164	0,137	0,028	20,4
53	0,220	0,200	0,240	0,244	0,226	0,020	9,0
82	0,396	0,396	0,384	0,352	0,382	0,021	5,4
113	0,780	0,936	0,732	0,492	0,735	0,184	25,0
148	1,284	1,736	1,388	0,788	1,299	0,392	30,2
182	1,980	2,516	2,068	1,148	1,928	0,571	29,6
225	2,780	3,424	2,824	1,588	2,654	0,769	29,0
271	3,448	4,172	3,308	1,892	3,205	0,954	29,8
321	3,984	4,628	3,792	2,216	3,655	1,024	28,0
389	4,500	5,096	4,296	2,580	4,118	1,080	26,2
453	5,064	5,552	4,832	2,964	4,603	1,133	24,6
531	5,624	5,848	5,136	3,348	4,989	1,134	22,7

Tabell D-24: Alle enkeltmålinger prisme P-UA i tverretning, middelerdi, standardavvik og var. koeff

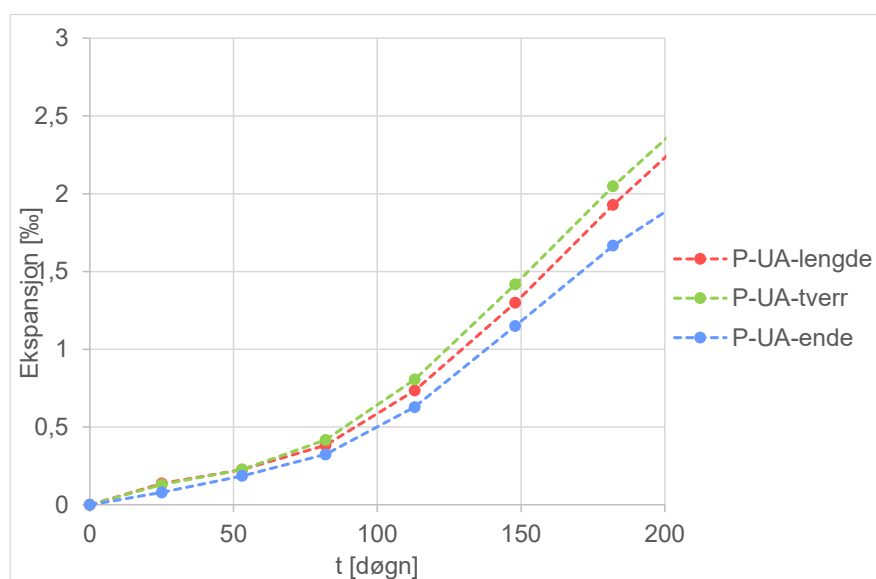
Døgn	P-UA-tverr-A	P-UA-tverr-B	P-UA-tverr-C	P-UA-tverr-D	P-UA-tverr	Std.dev	Var coff %
25	0,124	0,108	0,128	0,160	0,130	0,022	16,8
53	0,212	0,224	0,216	0,256	0,227	0,020	8,8
82	0,388	0,504	0,372	0,404	0,417	0,059	14,3
113	0,684	1,136	0,708	0,696	0,806	0,220	27,3
148	1,224	2,032	1,236	1,180	1,418	0,410	28,9
182	1,800	2,944	1,784	1,664	2,048	0,600	29,3
225	2,464	3,988	2,380	2,228	2,765	0,821	29,7
271	2,988	4,864	2,812	2,628	3,323	1,038	31,2
321	3,500	5,308	3,284	2,940	3,758	1,059	28,2
389	3,952	5,748	3,780	3,332	4,203	1,063	25,3
453	4,496	6,176	4,308	3,768	4,687	1,040	22,2
531	5,096	6,476	4,624	4,164	5,090	0,999	19,6

Tabell D-25: Alle enkeltmålinger prisme P-UA ved ende, middelverdi, standardavvik og var. koeff

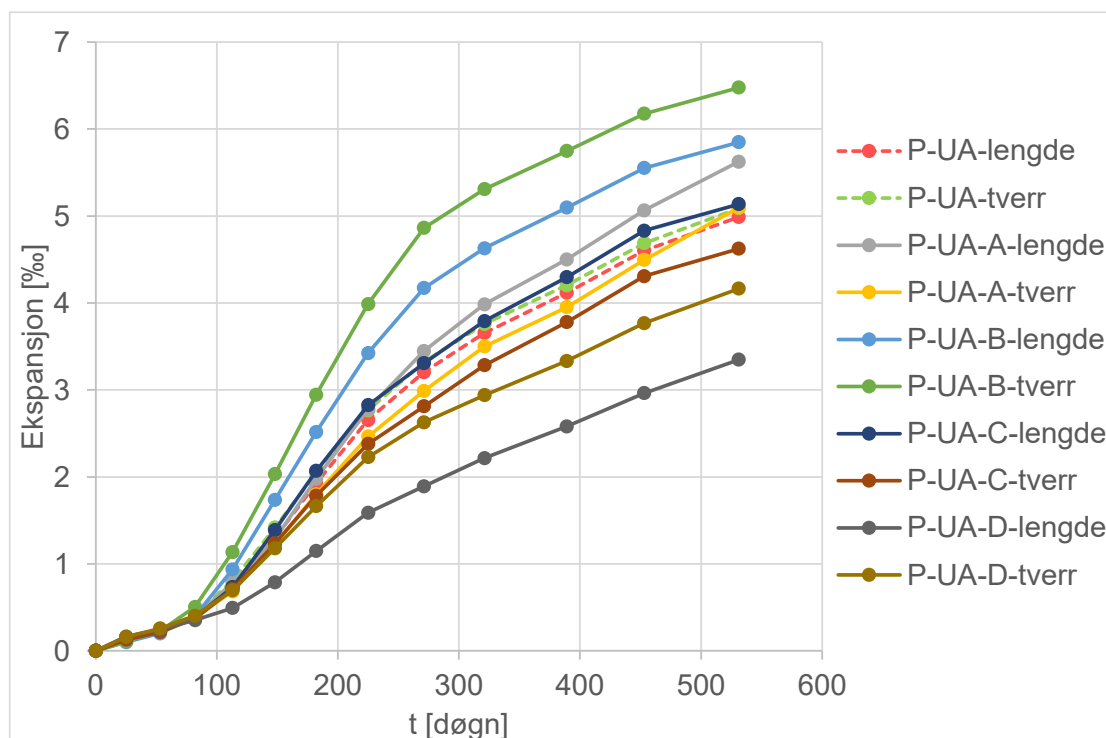
Døgn	P-UA-ende-A	P-UA-ende-C	P-UA-ende	Std.dev	Var coff %
25	0,096	0,064	0,080	0,023	28,3
53	0,192	0,18	0,186	0,008	4,6
82	0,316	0,332	0,324	0,011	3,5
113	0,580	0,676	0,628	0,068	10,8
148	1,068	1,232	1,150	0,116	10,1
182	1,564	1,768	1,666	0,144	8,7
225	2,016	2,348	2,182	0,235	10,8
271	2,344	2,652	2,498	0,218	8,7
321	2,720	3,056	2,888	0,238	8,2
389	3,052	3,464	3,258	0,291	8,9
453	3,412	3,828	3,620	0,294	8,1
531	3,872	4,056	3,964	0,130	3,3



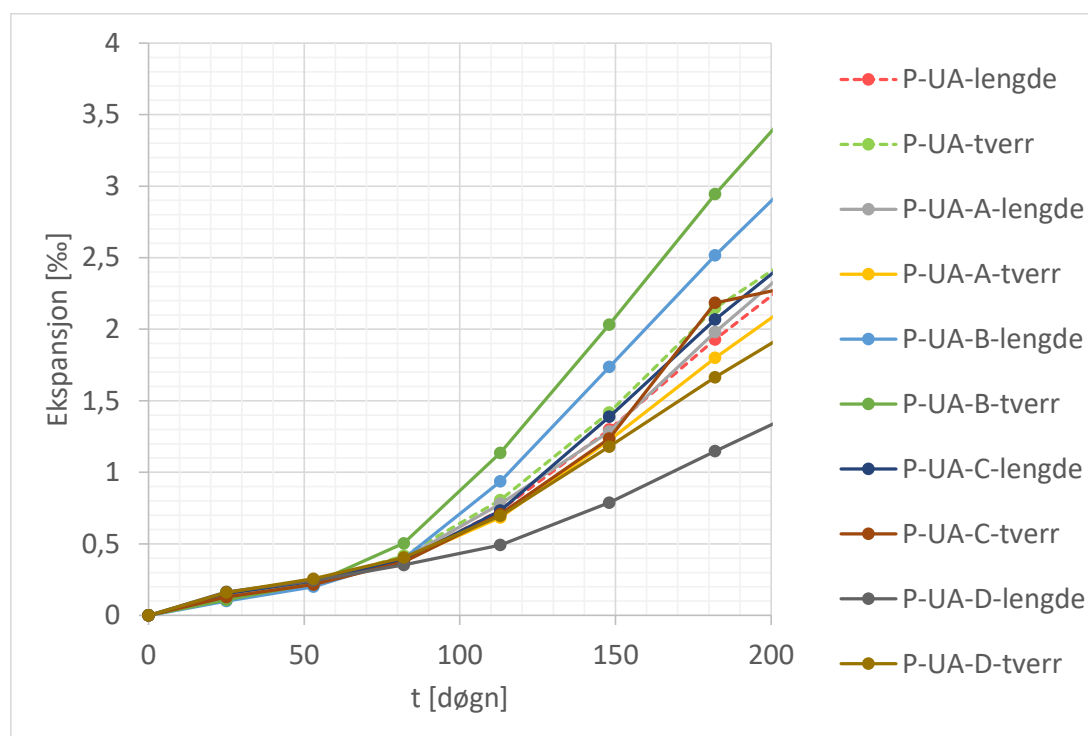
Figur D-1: Middelverdier i lengde-, tverr- og ende P-UA



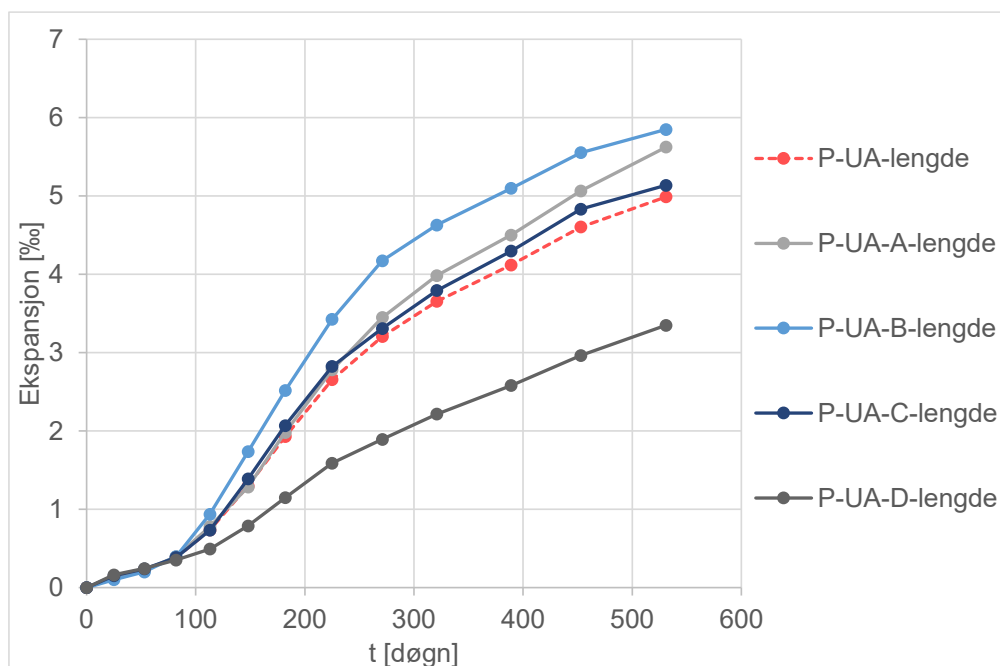
Figur D-2: Middelverdier i lengde-, tverr- og ende P-UA frem til 200 døgn



Figur D-363: Ekspansjoner alle enkeltmålinger prisme P-UA



Figur D-4: Ekspansjoner alle enkeltmålinger prisme P-UA frem til 200 døgn

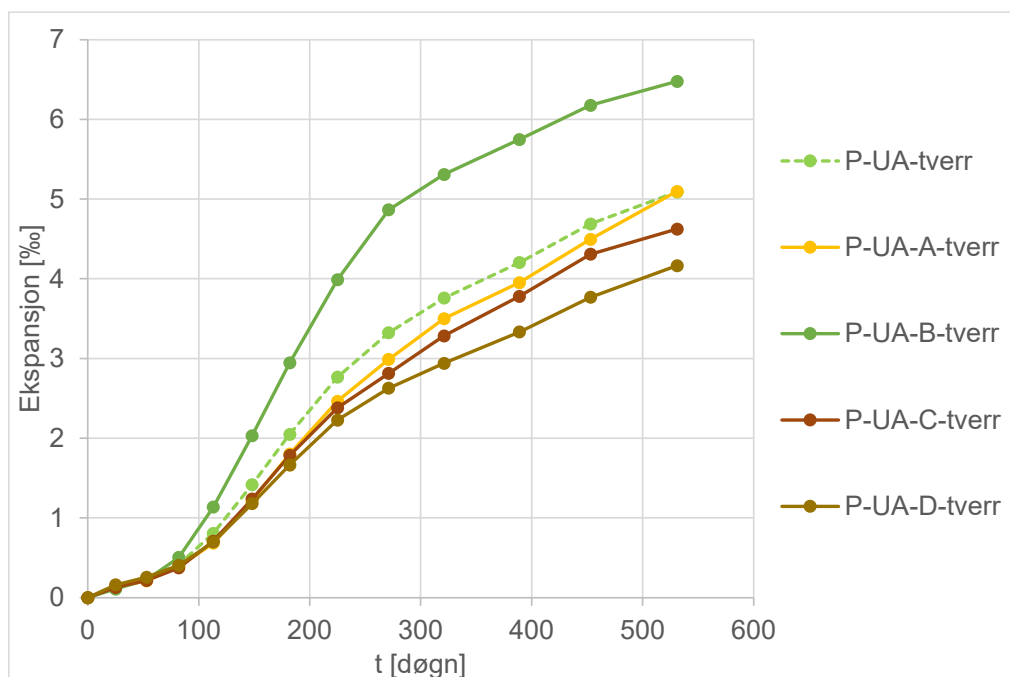


Figur D-564: Ekspansjoner alle enkeltmålinger i lengderetning prisme P-UA

Denne uarmerte prøven deformerer seg også ganske plant mellom flate B og flate D siden målingene på flatene A og C er så like. Hvis vi først betrakter de målte tøyningene som en kombinasjon av en aksialtøyning og en bøyetøyning, må er nøytralaksen i dette tilfellet noe nærmere flate D enn flate B. Det er imidlertid ikke slik dette virker. Et slikt prisme i betong er ikke i stand til å sette opp en så stor tøyninggradient som det som etter hvert utvikler seg i dette tilfellet når det i tillegg ekspanderer. Strekk-tøyningsevnen til en betong som ikke har ekspandert er vanligvis i området 0,1 – 0,2 ‰. Til denne tøyningen er det knyttet en spenning som er bestemt av E-modulen til betongen som enten er en korttids eller en langtids E-modul avhengig av om lasten har kort eller lang varighet. Her er det en langtids E-modul.

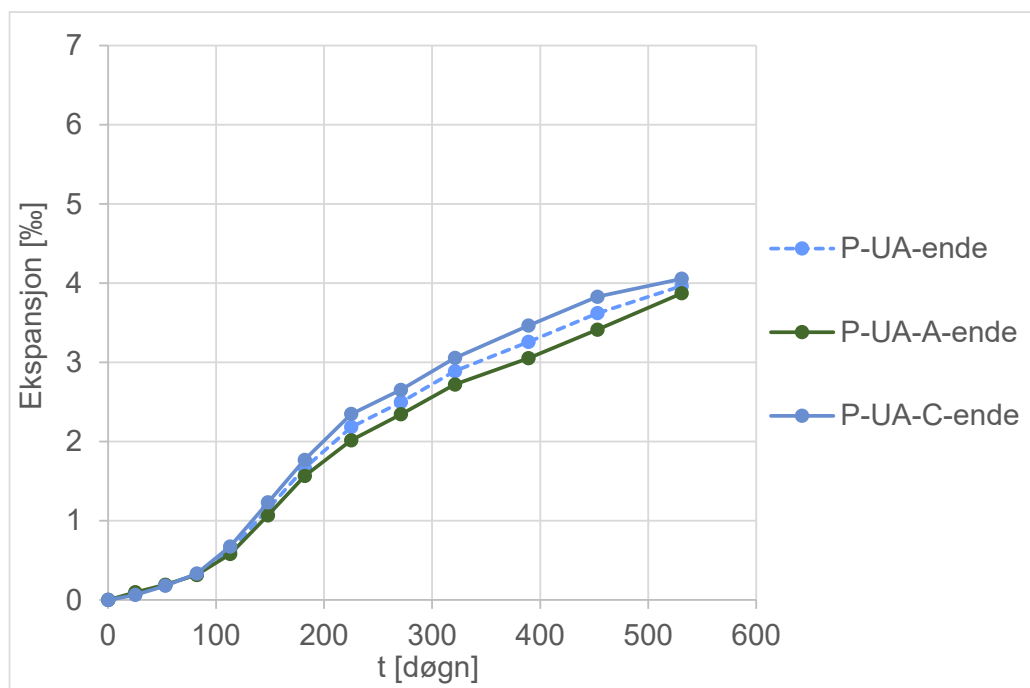
Men selv om betongen har ekspandert langt utover tøyningsevnen til en uskadet betong har den både en strekk-tøynings og -spennings evne. Dette viser bl.a. bjelkeforsøkene våre. Det er likevel å forvente at begge disse verdiene avtar med ekspansjonen. Disse målingene i lengderetningen til prismet viser likevel at denne betongen selve ved store ekspansjoner har nok strekk- og skjærfasthet til å lage en ganske plan tøyningstilstand i de frie prøvene.

Flate B har både størst lengde- og tverrtøyning. De andre lengde- og tverrtøyningene har også samme innbyrdes plassering.

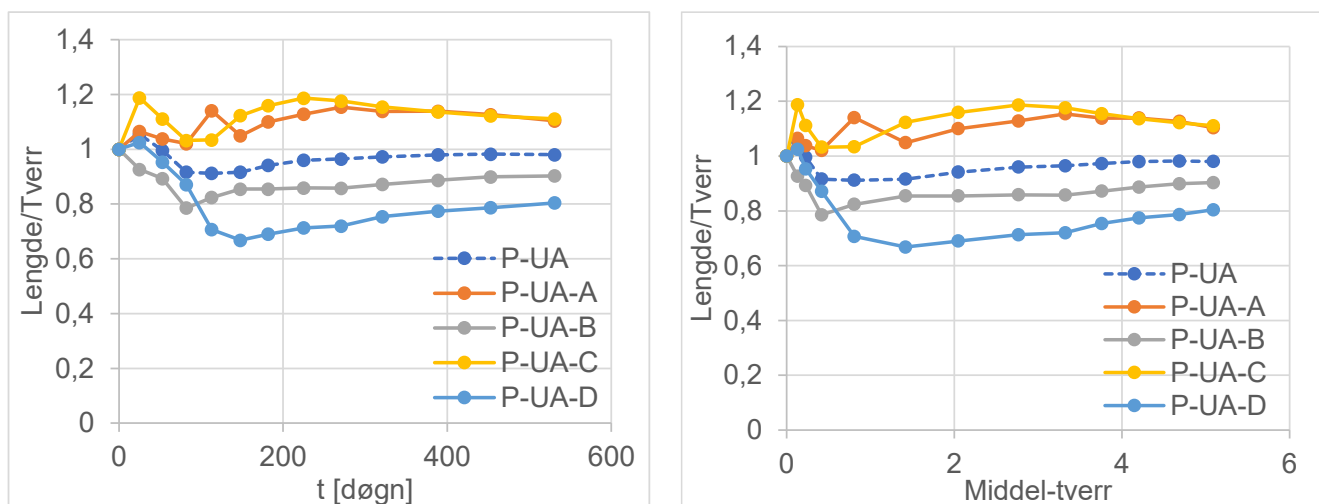


Figur D-6: Ekspansjoner alle enkeltmålinger i tverretning prisme P-UA

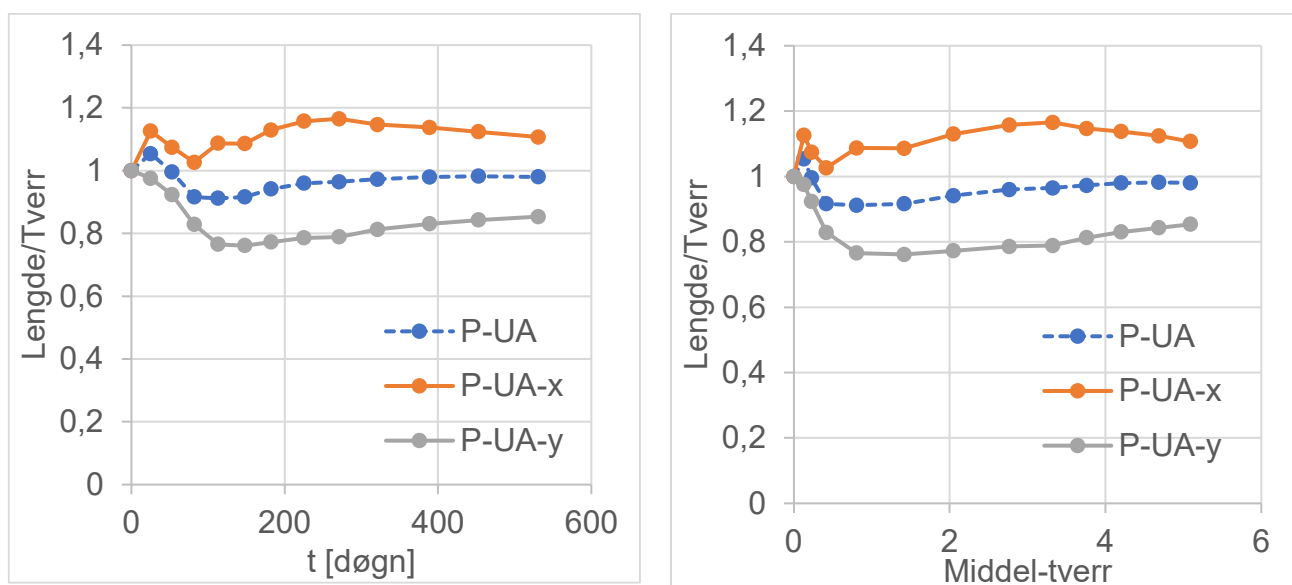
Her er det en måling som er mye høyere enn de andre. Siden det bare er flate B som skiller seg spesielt ut, er det sannsynlig at denne prøven har mye eller mest ekspansjon i tverr-retningen i et område midt på denne flaten. Både lengde- og tverrtøyningen på flate B skiller seg ut som spesielt store på denne prøven. Dessuten er lengdetøyningen på flate D spesielt lav.



Figur D-765: Ekspansjoner alle enkeltmålinger ved ende i tverretning prisme P-UA



Figur D-8: Lengde/tverretning mot antall døgn og middelvei i tverretning for prisme P-UA



Figur D-966: Lengde/tverretning mot antall døgn og middelvei i tverretning for prisme P-UA i x- (Side A og C) og y- (Side B og D) retning

D.2: Prisme med 4Ø16 mm stenger; P-Ø16

Tabell D-26: Alle enkeltmålinger prisme P-Ø16 i lengderetning, middelerverdi, st.dev og var. koef

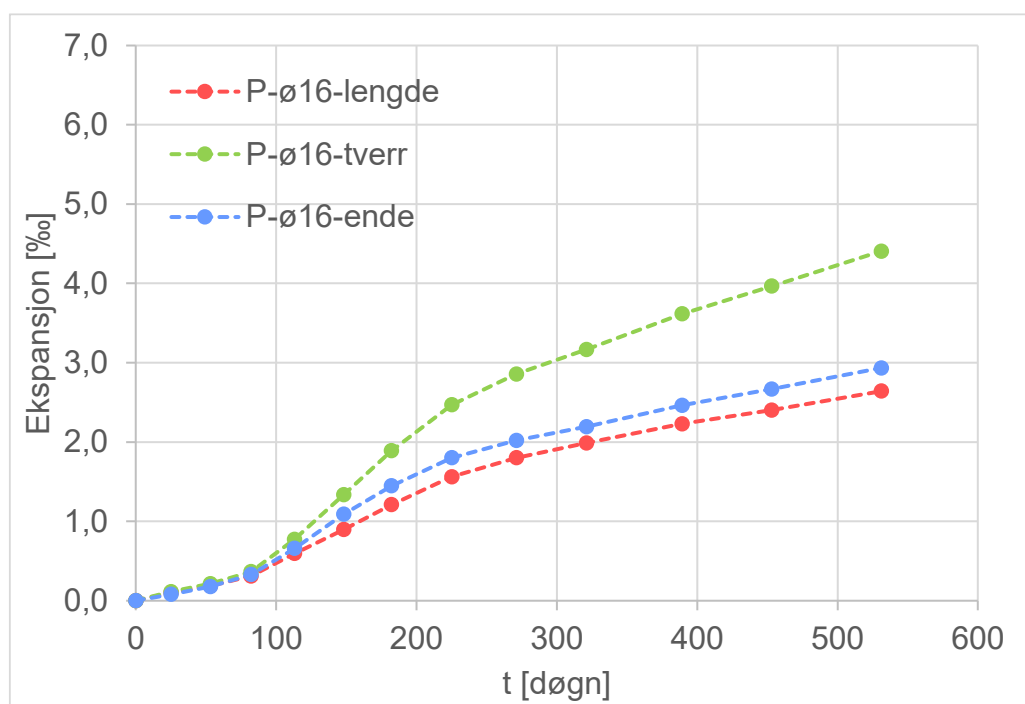
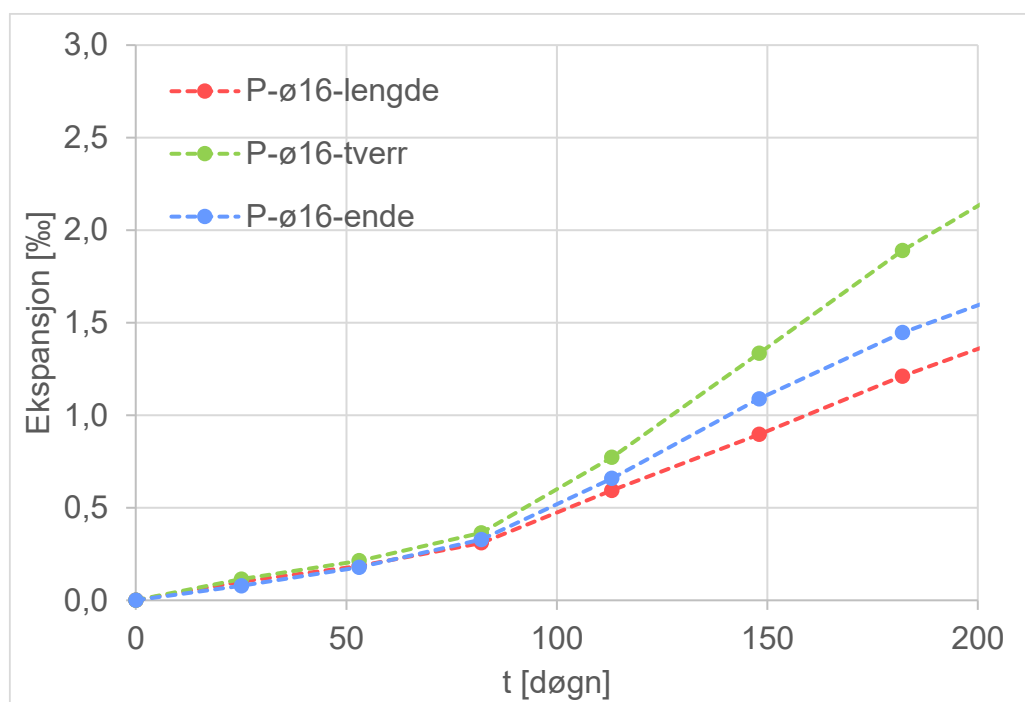
Døgn	P-Ø16-lengde-A	P-Ø16-lengde-B	P-Ø16-lengde-C	P-Ø16-lengde-D	P-Ø16-lengde	Std.dev	Var coff %
25	0,104	0,084	0,088	0,128	0,101	0,020	19,8
53	0,192	0,164	0,164	0,220	0,185	0,027	14,5
82	0,344	0,292	0,276	0,328	0,310	0,031	10,1
113	0,676	0,608	0,520	0,568	0,593	0,066	11,1
148	1,092	0,920	0,792	0,780	0,896	0,145	16,2
182	1,508	1,248	1,100	0,984	1,210	0,226	18,7
225	1,884	1,608	1,420	1,336	1,562	0,243	15,6
271	2,104	1,828	1,696	1,575	1,801	0,227	12,6
321	2,296	2,012	1,900	1,743	1,988	0,233	11,7
389	2,584	2,220	2,160	1,955	2,230	0,262	11,8
453	2,784	2,380	2,344	2,099	2,402	0,284	11,8
531	3,084	2,608	2,568	2,303	2,641	0,325	12,3

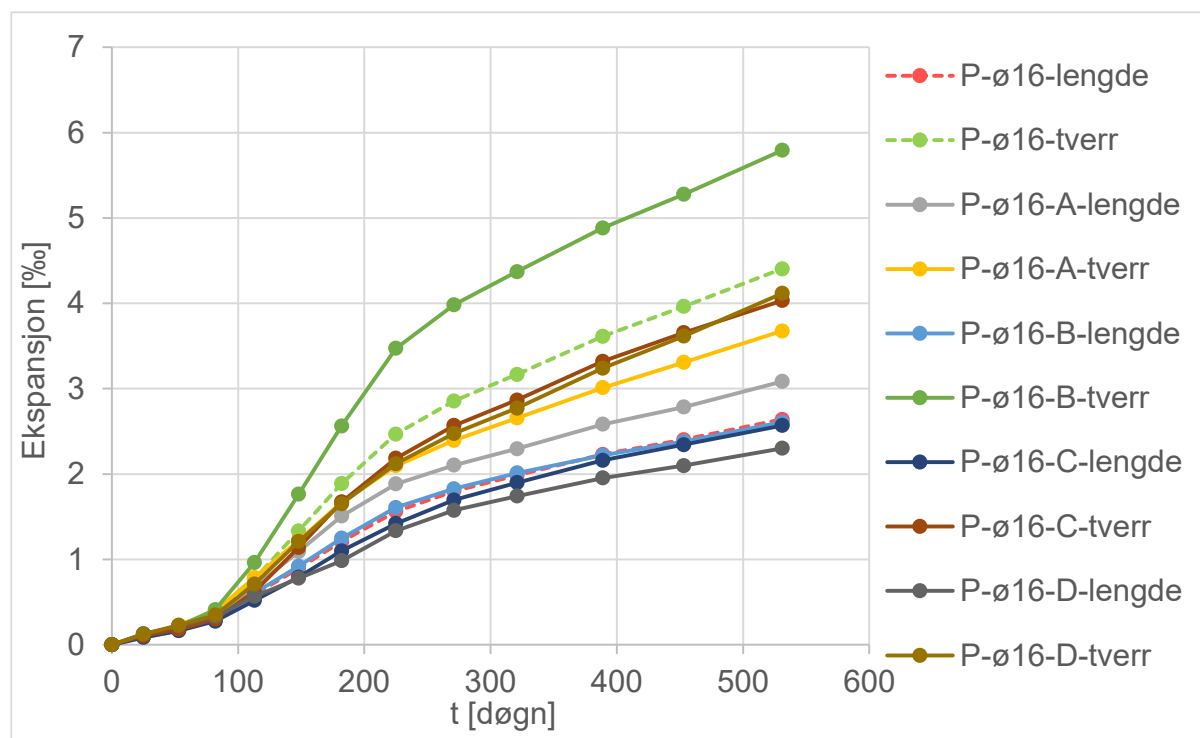
Tabell D-27: Alle enkeltmålinger prisme P-Ø16 i tverretning, middelerverdi, standardavvik og var. koef

Døgn	P-Ø16-tverr-A	P-Ø16-tverr-B	P-Ø16-tverr-C	P-Ø16-tverr-D	P-Ø16-tverr	Std.dev	Var coff %
25	0,108	0,120	0,104	0,124	0,114	0,010	8,4
53	0,228	0,216	0,180	0,228	0,213	0,023	10,7
82	0,396	0,412	0,300	0,348	0,364	0,051	13,9
113	0,788	0,964	0,624	0,712	0,772	0,144	18,7
148	1,220	1,764	1,140	1,212	1,334	0,289	21,7
182	1,668	2,564	1,672	1,652	1,889	0,450	23,8
225	2,096	3,472	2,184	2,120	2,468	0,670	27,2
271	2,396	3,984	2,568	2,476	2,856	0,755	26,4
321	2,656	4,372	2,868	2,772	3,167	0,808	25,5
389	3,012	4,884	3,320	3,240	3,614	0,857	23,7
453	3,308	5,276	3,656	3,616	3,964	0,888	22,4
531	3,676	5,792	4,032	4,116	4,404	0,945	21,5

Tabell D-28: Alle enkeltmålinger prisme P-Ø16 ved ende, middelerverdi, standardavvik og var. koef

Døgn	P-Ø16-ende-A	P-Ø16-ende-C	P-Ø16-ende	Std.dev	Var coff %
25	0,088	0,068	0,078	0,014	18,1
53	0,192	0,164	0,178	0,020	11,1
82	0,364	0,292	0,328	0,051	15,5
113	0,764	0,552	0,658	0,150	22,8
148	1,240	0,936	1,088	0,215	19,8
182	1,700	1,192	1,446	0,359	24,8
225	2,168	1,432	1,800	0,520	28,9
271	2,416	1,624	2,020	0,560	27,7
321	2,596	1,788	2,192	0,571	26,1
389	2,892	2,032	2,462	0,608	24,7
453	3,100	2,236	2,668	0,611	22,9
531	3,388	2,476	2,932	0,645	22,0

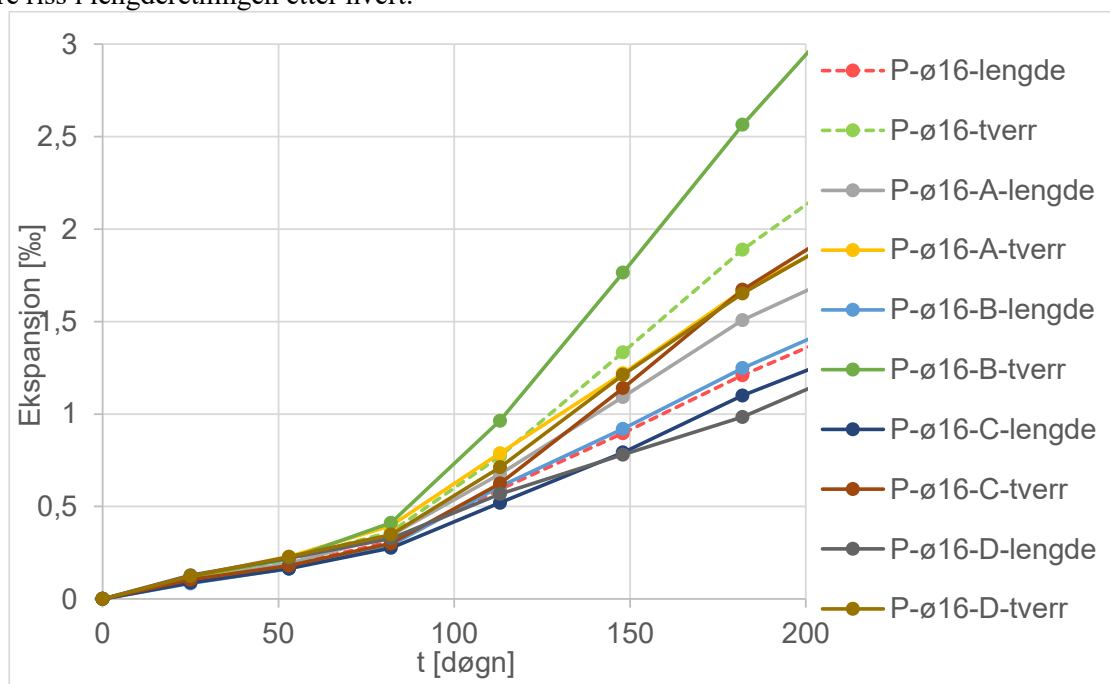
*Figur D-10: Middelverdier i lengde-, tverr- og ende P-ø16**Figur D-1167: Middelverdier i lengde-, tverr- og ende P-UA frem til 200 døgn*



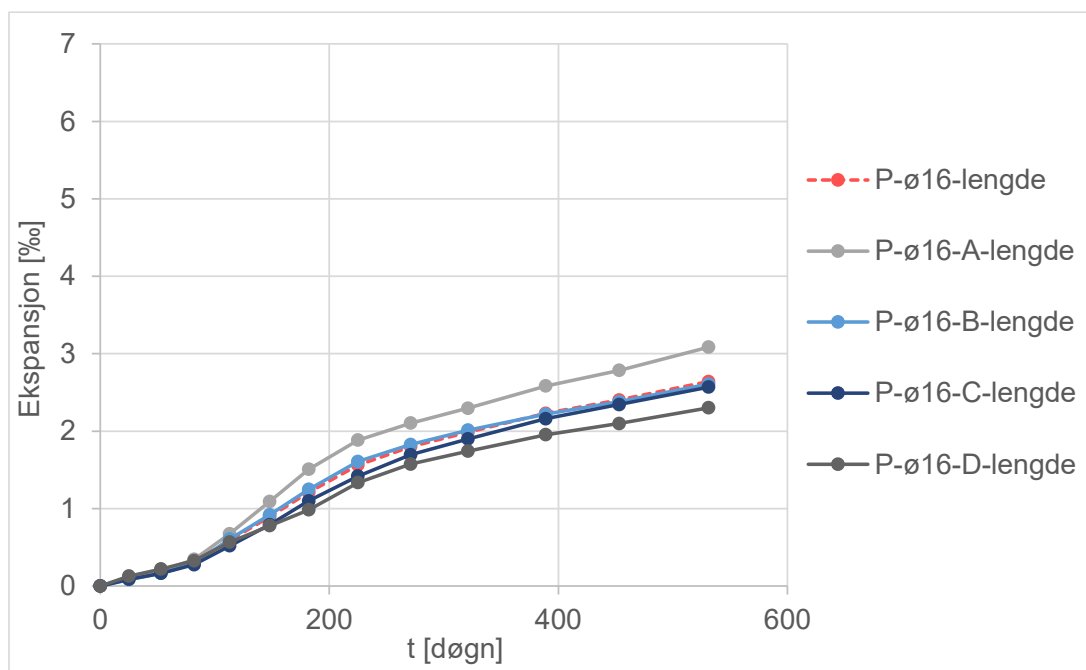
Figur D-1268: Ekspansjoner alle enkeltmålinger prisme P-ø16

Her er lengdetøyningen på flate A og tverrtøyningen på flate B størst. Lengdetøyningen på flate D er minst. Disse lengdemålingene stemmer derfor ikke med en plan tilstand. Selve endeflatene er antakelig likevel et plan i den ene enden og et annet plan i den andre enden inntil spenningene blir så store at de begynner å bøye seg.

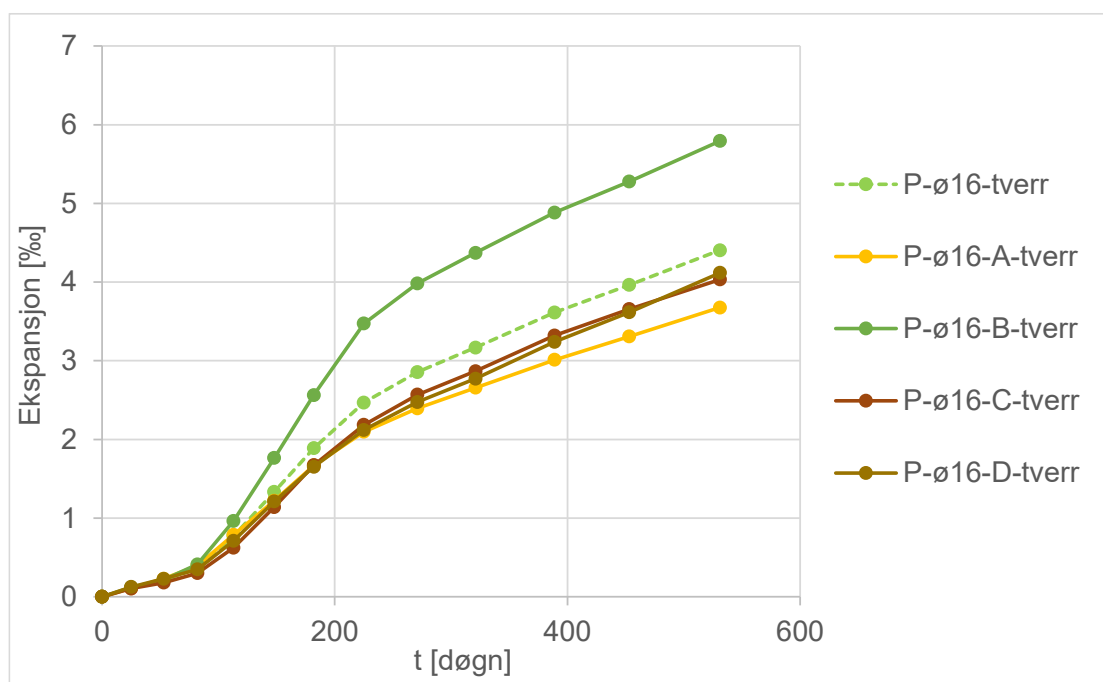
Det er her heller ikke noe samsvar mellom lengde- og tverrtøyningene. Flate B har betydelig større tverrtøyning enn de andre flatene som er ganske like. Flate A som har størst lengdetøyning får etter hvert minst tverrtøyning. Flate B har derfor stor deformasjon på tvers i starten og antakelig et eller flere riss i lengderetningen etter hvert.



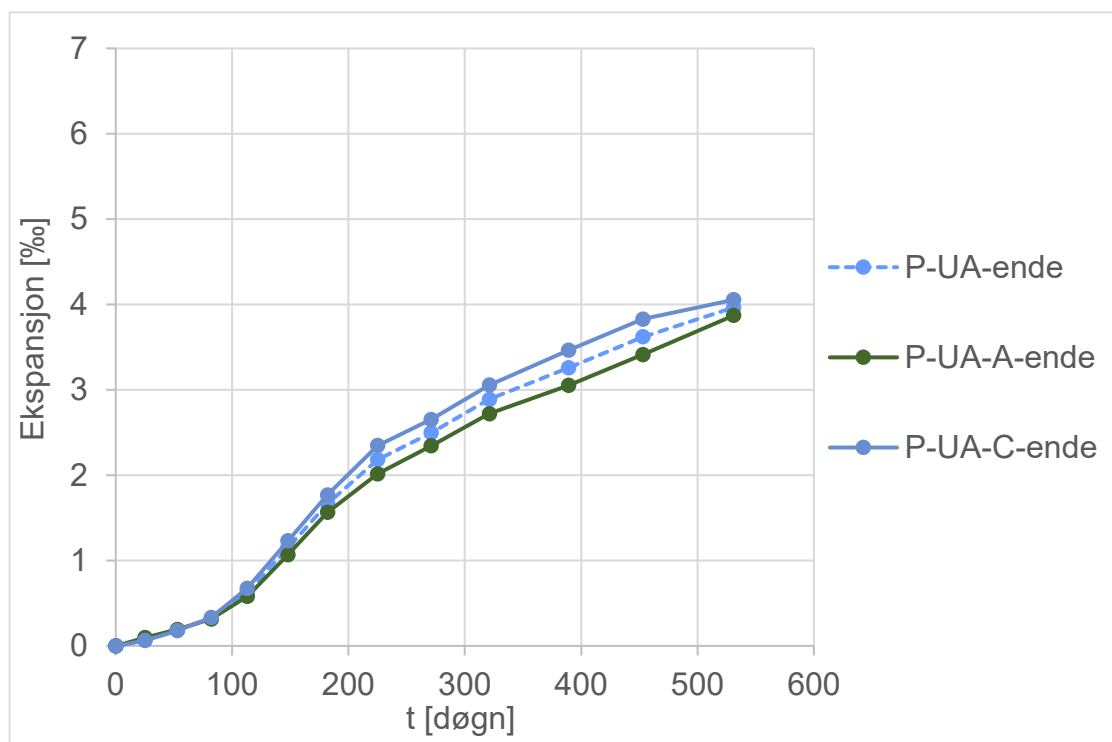
Figur D-1369: Ekspansjoner alle enkeltmålinger prisme P-ø16 frem til 200 døgn



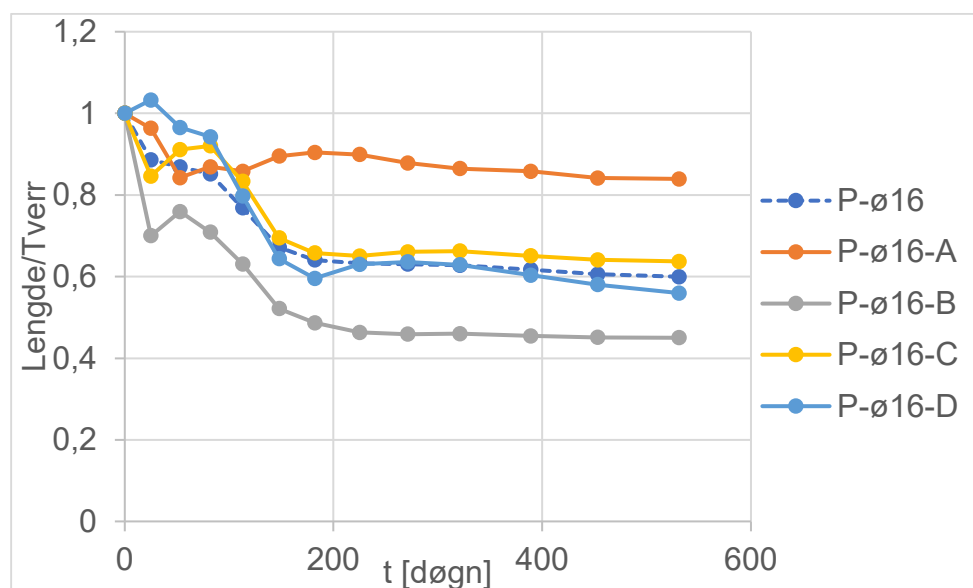
Figur D-14: Ekspansjoner alle enkeltmålinger i lengderetning prisme P-ø16



Figur D-1570: Ekspansjoner alle enkeltmålinger i tverretning prisme P-ø16



Figur D-1671: Ekspansjoner alle enkeltmålinger ved ende i tverretning prisme P-ø16



Figur D-1772: Lengde/tverretning prisme P-ø16 plottet mot antall døgn

D.3: Prismer med 4Ø20 mm stenger; P-Ø20-1 og P-Ø20-2

Tabell D-29: Alle enkeltmålinger prisme P-Ø20-1 i lengderetning, middelerdi, standardavvik og variasjons koeffisient %

Døgn	P-ø20-1-lengde-A	P-ø20-1-lengde-B	P-ø20-1-lengde-C	P-ø20-1-lengde-D	P-ø20-1-lengde	Std.dev	Var coff %
25	0,124	0,120	0,120	0,152	0,129	0,015	12,0
53	0,232	0,208	0,204	0,240	0,221	0,018	8,0
82	0,424	0,364	0,344	0,340	0,368	0,039	10,5
113	0,732	0,688	0,468	0,484	0,593	0,136	23,0
148	1,068	1,056	0,716	0,684	0,881	0,209	23,8
182	1,372	1,360	0,948	0,896	1,144	0,257	22,5
225	1,664	1,656	1,180	1,144	1,411	0,288	20,4
271	1,900	1,952	1,392	1,348	1,648	0,322	19,6
321	2,060	2,160	1,520	1,516	1,814	0,344	19,0
389	2,312	2,408	1,684	1,696	2,025	0,389	19,2
453	2,456	2,596	1,812	1,876	2,185	0,399	18,2
531	2,676	2,832	2,027	2,064	2,400	0,414	17,3

Tabell D-30: Alle enkeltmålinger prisme P-Ø20-1 i tverretning, middelerdi, standardavvik og variasjons koeffisient %

Døgn	P-ø20-1-tverr-A	P-ø20-1-tverr-B	P-ø20-1-tverr-C	P-ø20-1-tverr-D	P-ø20-1-tverr	Std.dev	Var coff %
25	0,104	0,136	0,132	0,196	0,142	0,039	27,3
53	0,200	0,228	0,244	0,280	0,238	0,033	14,0
82	0,440	0,388	0,532	0,384	0,436	0,069	15,8
113	0,844	0,860	1,144	0,568	0,854	0,235	27,5
148	1,376	1,393	1,928	0,852	1,387	0,439	31,7
182	1,856	2,237	2,612	1,168	1,968	0,616	31,3
225	2,364	3,097	3,460	1,576	2,624	0,834	31,8
271	2,824	3,753	4,024	1,952	3,138	0,943	30,1
321	3,232	4,249	4,488	2,248	3,554	1,027	28,9
389	3,792	4,857	5,092	2,684	4,106	1,104	26,9
453	4,312	5,397	5,616	3,156	4,620	1,131	24,5
531	4,856	5,973	6,136	3,668	5,158	1,145	22,2

Tabell D-31: Alle enkeltmålinger prisme P-Ø20-1 ved ende, middelerverdi, standardavvik og variasjons koeffisient %

Døgn	P-ø20-1- ende-A	P-ø20-1- ende-C	P-ø20-1- ende	Std.dev	Var coff %
25	0,076	0,084	0,080	0,006	7,1
53	0,144	0,164	0,154	0,014	9,2
82	0,3	0,388	0,344	0,062	18,1
113	0,588	0,776	0,682	0,133	19,5
148	0,892	1,224	1,058	0,235	22,2
182	1,144	1,632	1,388	0,345	24,9
225	1,372	2,06	1,716	0,486	28,4
271	1,604	2,388	1,996	0,554	27,8
321	1,784	2,624	2,204	0,594	26,9
389	2,016	2,94	2,478	0,653	26,4
453	2,224	3,24	2,732	0,718	26,3
531	2,436	3,556	2,996	0,792	26,4

Tabell D-32: Alle enkeltmålinger prisme P-Ø20-2 i lengderetning, middelerverdi, standardavvik og variasjons koeffisient %

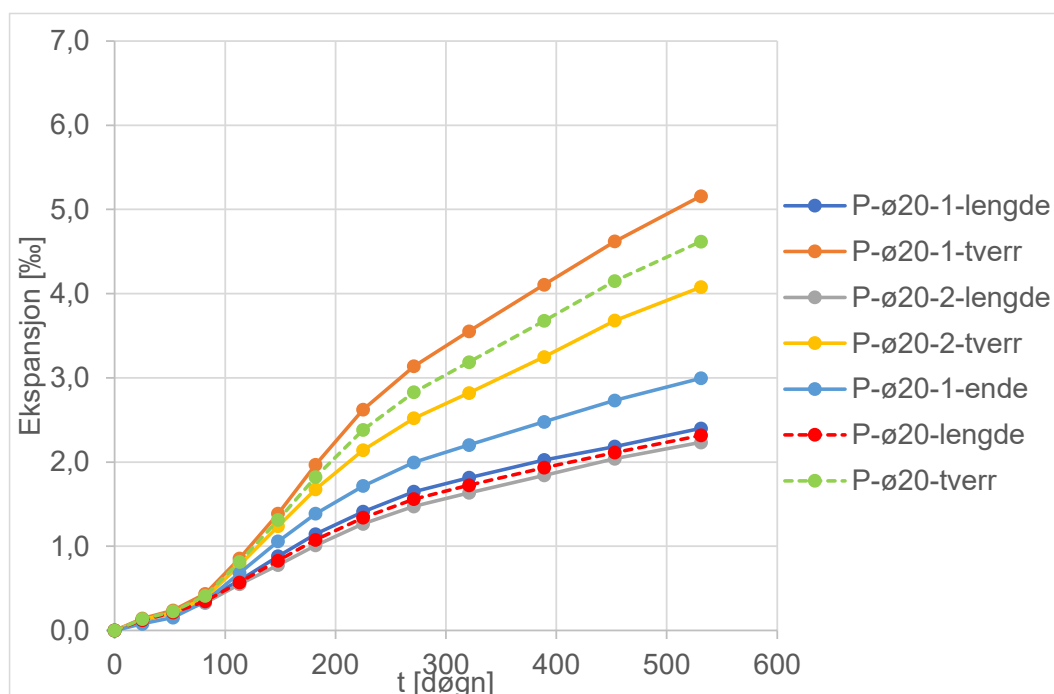
Døgn	P-ø20-2- lengde-A	P-ø20-2- lengde- B	P-ø20-2- lengde- C	P-ø20-2- lengde- D	P- ø20-2- lengde	Std.dev	Var coff %
25	0,128	0,096	0,136	0,112	0,118	0,018	15,0
53	0,196	0,188	0,244	0,188	0,204	0,027	13,2
82	0,280	0,400	0,396	0,232	0,327	0,084	25,8
113	0,468	0,708	0,620	0,400	0,549	0,140	25,6
148	0,660	0,960	0,940	0,544	0,776	0,207	26,6
182	0,868	1,188	1,244	0,744	1,011	0,243	24,0
225	1,124	1,412	1,576	0,956	1,267	0,279	22,0
271	1,348	1,612	1,788	1,148	1,474	0,283	19,2
321	1,488	1,804	1,968	1,280	1,635	0,309	18,9
389	1,692	2,028	2,188	1,456	1,841	0,330	17,9
453	1,840	2,232	2,440	1,648	2,040	0,361	17,7
531	2,004	2,416	2,676	1,836	2,233	0,383	17,1

Tabell D-33: Alle enkeltmålinger prisme P-Ø20-2 i tverretning, middelerverdi, standardavvik og variasjons koeffisient %

Døgn	P-ø20-2- tverr-A	P-ø20-2- tverr- B	P-ø20-2- tverr- C	P-ø20-2- tverr- D	P-ø20-2- tverr	Std.dev	Var coff %
25	0,152	0,120	0,112	0,124	0,127	0,017	13,7
53	0,224	0,220	0,208	0,204	0,214	0,010	4,4
82	0,380	0,444	0,400	0,320	0,386	0,051	13,3
113	0,716	0,880	0,936	0,564	0,774	0,168	21,7
148	1,216	1,384	1,476	0,876	1,238	0,264	21,3
182	1,668	1,852	1,904	1,288	1,678	0,279	16,6
225	2,124	2,328	2,324	1,792	2,142	0,252	11,8
271	2,480	2,744	2,656	2,200	2,520	0,240	9,5
321	2,768	3,096	2,896	2,524	2,821	0,240	8,5
389	3,192	3,588	3,244	2,972	3,249	0,255	7,8
453	3,612	4,040	3,584	3,484	3,680	0,246	6,7
531	4,024	4,392	3,892	4,004	4,078	0,217	5,3

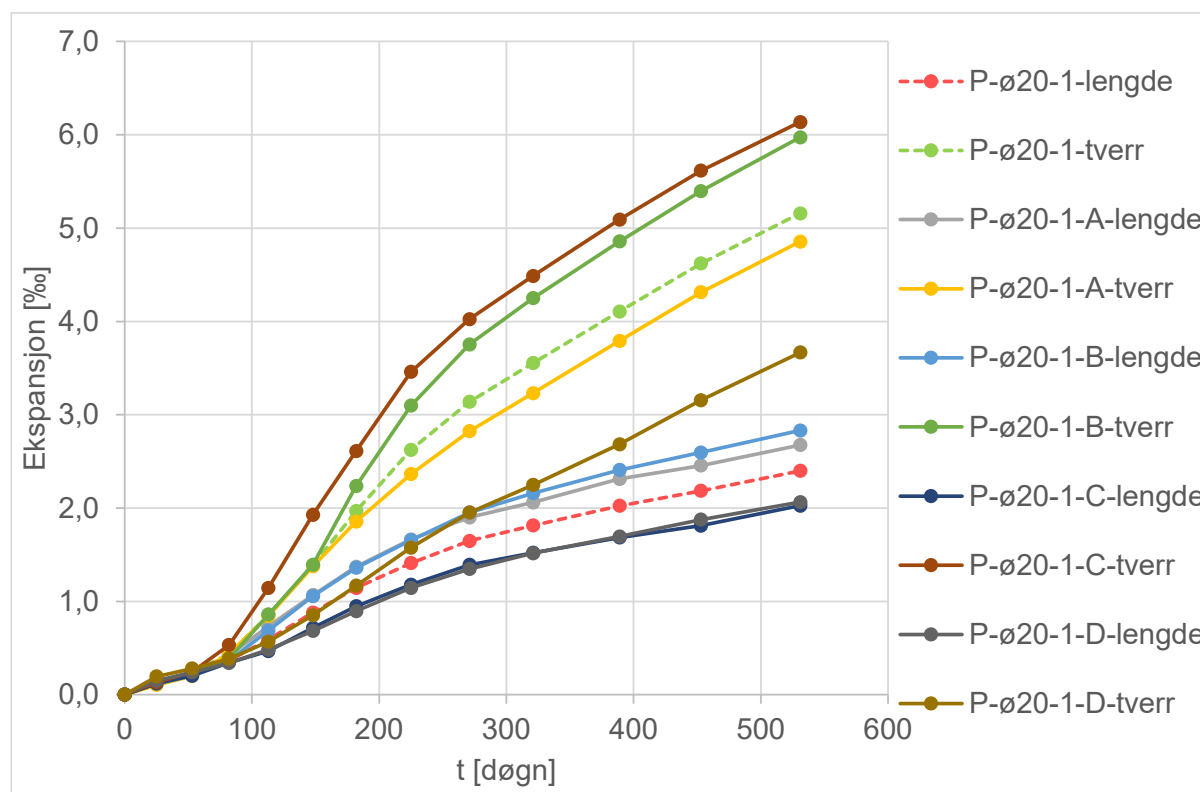
Tabell D-34: Middelverdier for prismer P-ø20-lengde og tverrretning med Standaravvik og variasjonskoeffisient %

Døgn	P-ø20-lengde	Std.dev	Var coff %	P-ø20-tverr	Std.dev	Var coff %
25	0,124	0,016	13,3	0,135	0,029	21,5
53	0,213	0,023	10,8	0,226	0,026	11,5
82	0,348	0,065	18,6	0,411	0,062	15,2
113	0,571	0,130	22,8	0,814	0,194	23,8
148	0,829	0,201	24,2	1,313	0,345	26,3
182	1,078	0,242	22,5	1,823	0,469	25,7
225	1,339	0,274	20,4	2,383	0,626	26,3
271	1,561	0,296	18,9	2,829	0,718	25,4
321	1,725	0,318	18,4	3,188	0,794	24,9
389	1,933	0,348	18,0	3,678	0,872	23,7
453	2,113	0,360	17,1	4,150	0,909	21,9
531	2,316	0,380	16,4	4,618	0,957	20,7



Figur D-1873: Ekspansjoner middelverdier prismer P-Ø20-1 og P-Ø20-2 i lengde, tverr- og ende-retning

For middelverdiene er ekspansjonen til Prøve 2 er lavere enn ekspansjonen til Prøve 1 i både lengde- og tverr-retningen. Tverrtøyningen er likevel forholdsvis større i Prøve 1 enn i Prøve 2.

P-Ø20-1:

Figur D-19: Ekspansjoner alle enkeltmålinger prisme P-Ø20-1

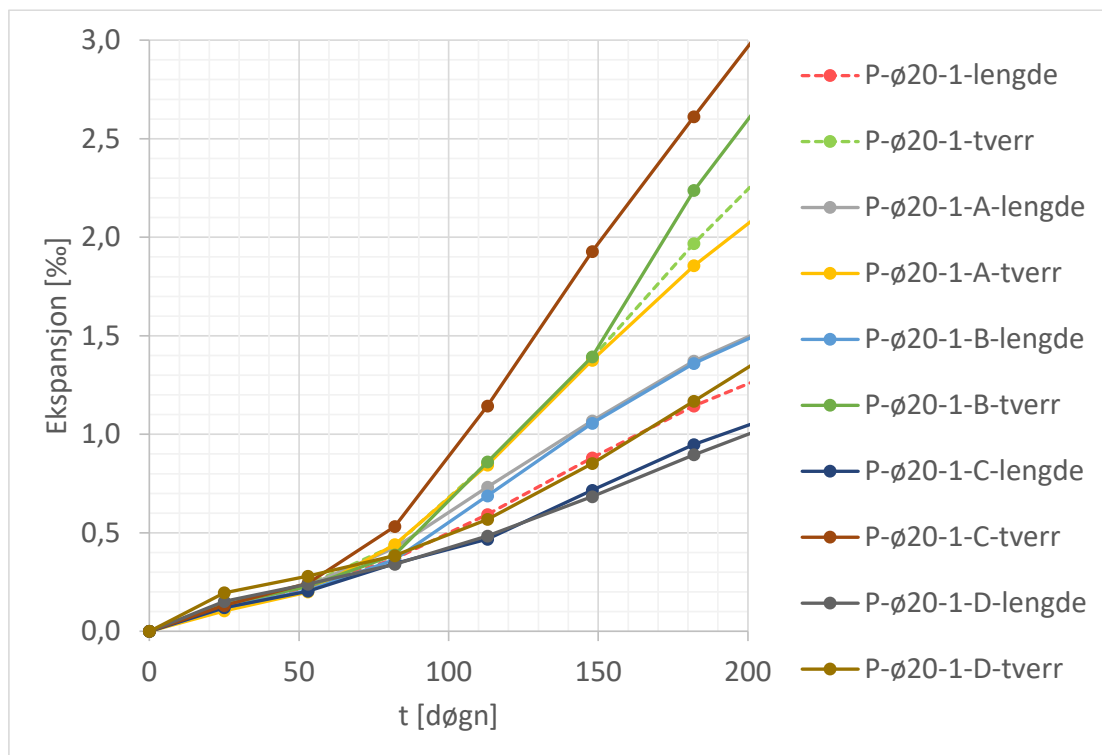
Denne prøven er litt spesiell. Alle målingene er ganske like opp til 0,25 %. Da begynner den å ekspandere mer i tverr-retningen på flate A, B og C. Mest på flate C i starten, men etter hvert nesten like mye på flate B, mens flate A øker mer jevnt og ikke får så stor ekspansjon på tvers. Ekspansjonen i tverr-retningen er betydelig mindre på flate D enn på de andre flatene i starten. Den er også mindre enn lengderetningen til flate A og B ganske lenge, helt til ekspansjonen er ca 2 % langs disse tre linjene. Fra da av øker den mer i tverr-retningen til flate D enn i lengderetningen til flate A og flate B. Tverr-retningen til flate D er likevel hele tiden høyere enn lengderetningen til flate D. Flate D har sammen med flate C den minste lengdetøyningen.

Ved en tøyning i lengderetningen på 2 % er trykkspenningen i betongen fra armeringen ca 7,5 MPa i lengderetningen. Platene i endene på denne prøven er 15 mm tykke, og de begynner antakelig å flyte inne ved armeringsstengene ved noenlunde denne spenningen. Vi kan likevel ikke se at dette forholdet skal ha så mye med utviklingen av tverrtøyningene å gjøre. Utviklingen av de andre tverrtøyningene med tiden begynner fra da av å avta litt.

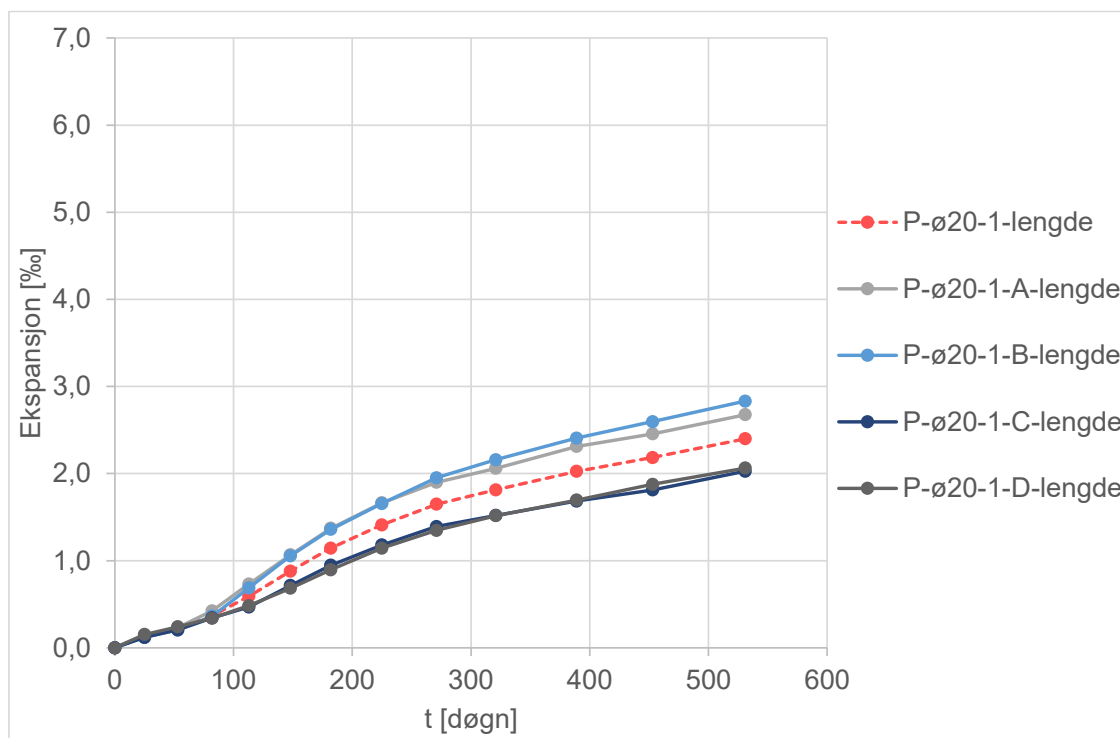
I lengderetningen har motstående flater størst og minst ekspansjon. Ekspansjonen på flate A og B som er størst og på flate C og D som er minst er også så like at de stemmer bra med et plan som går gjennom en akse gjennom hjørne A-D og hjørne B-C. Denne utviklingen starter allerede ved en tøyning på ca 0,5 % og utvikler seg noe mer med tiden fra en forskjell mellom de to verdiene på ca 0,3 % i starten til ca 0,7 % mot slutten da gjennomsnittstøyningen har økt til ca 2 %.

Innbyrdes plassering av lengde- og tverrtøyningene er ikke det samme for alle flatene til denne prøven. De er begge minst på flate D, mens lengdetøyningen er liten og tverrtøyningen stor for

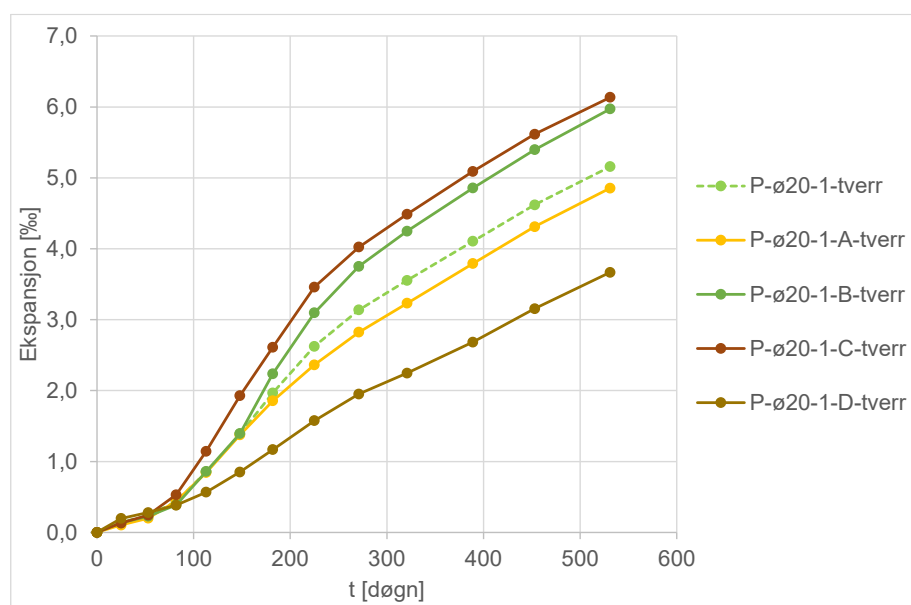
flate C. For flate A og flate B stemmer innbyrdes plassering bedre, men tverrtøyningen på flate B er ganske mye større enn på flate A. Det at flate B og flate C har de klart største tverrtøyningene, tyder på en ganske stor lokal ekspansjon i tverr-retningen i hjørnet mellom flate B og flate C.



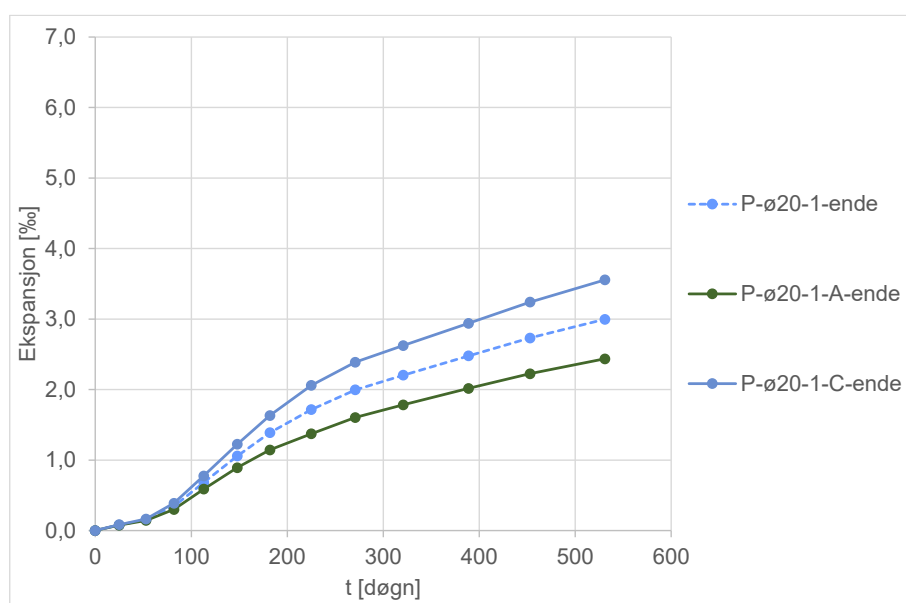
Figur D-2074: Ekspansjoner alle enkeltmålinger prisme P-ø20-1 frem til 200 døgn



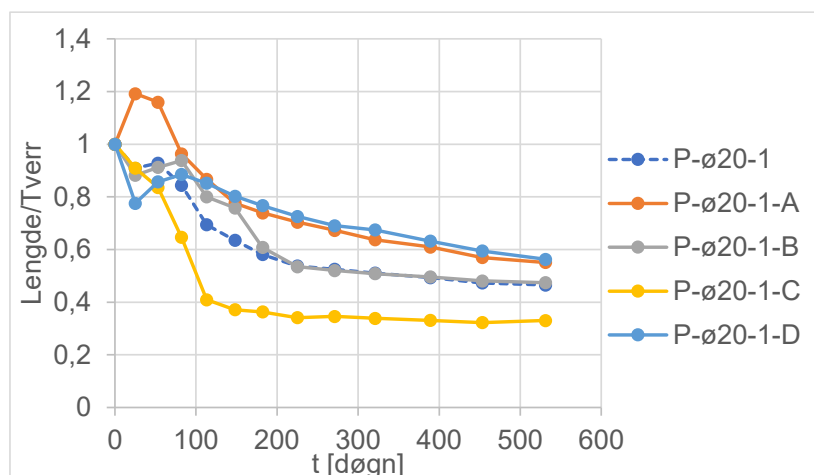
Figur D-2175: Ekspansjoner alle enkeltmålinger i lengderetning prisme P-ø20-1



Figur D-2276: Ekspansjoner alle enkeltmålinger i tverretning prisme P-ø20-1

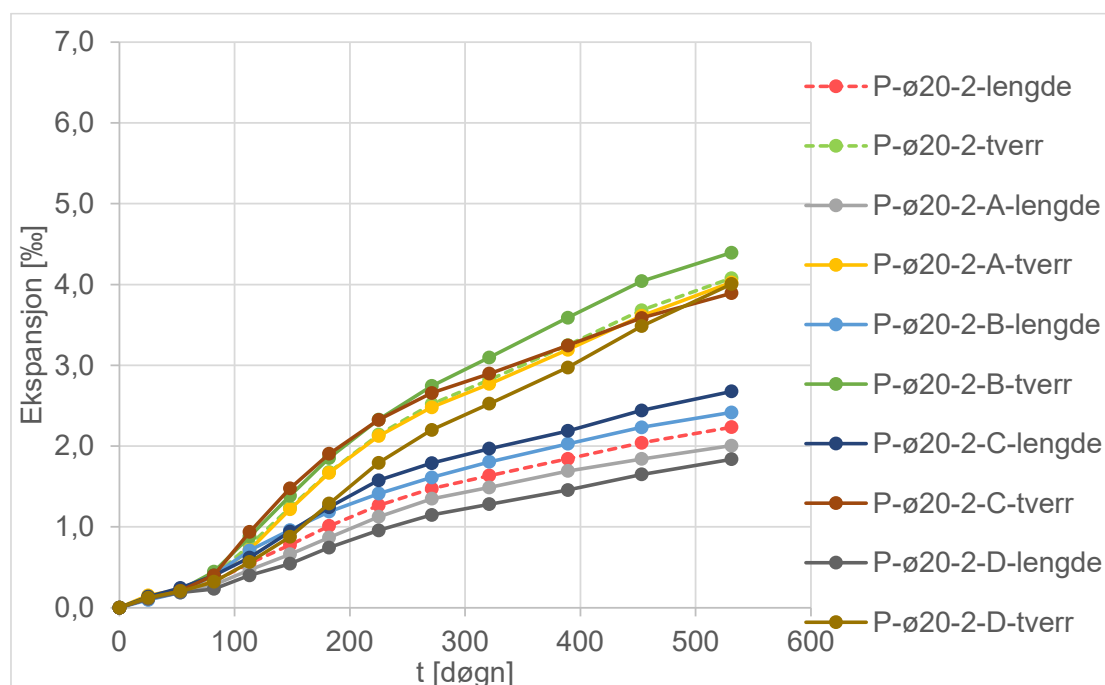


Figur D-2377: Ekspansjoner alle enkeltmålinger ved ende i tverretning prisme P-UA



Figur D-2478: Lengde/Tverr for prisme P-ø20-1 plottet mot antall døgn

P-Ø20-2:

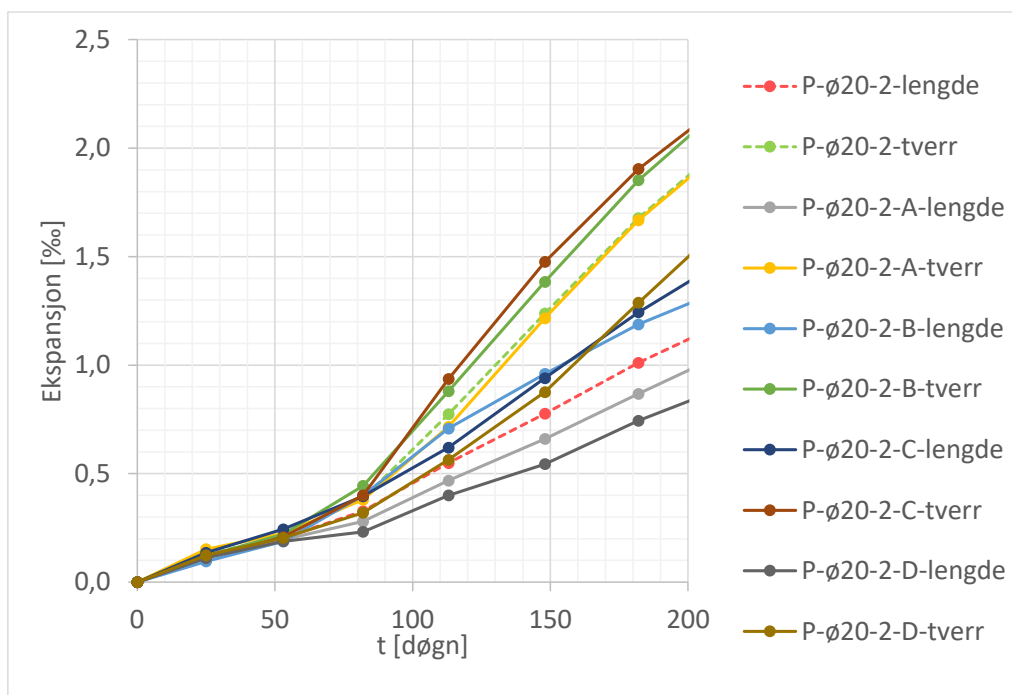


Figur D-2579: Ekspansjoner alle enkeltmålinger prisme P-ø20-2

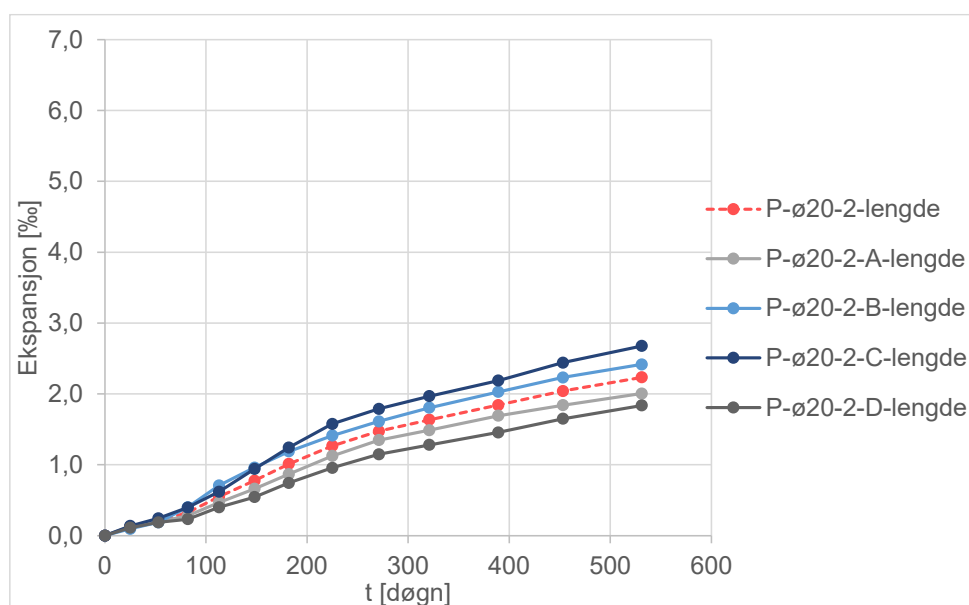
Denne prøven er ganske lik P-Ø20-1 i lengderetningen selv om flate A og flate C nå har skiftet plass og det er litt større forskjell på de to laveste og de to høyeste verdiene.

Også i dette tilfellet er tverrtøyningen på flate D liten i starten, men den stiger etter hvert opp mot tverrtøyningene på de andre flatene. Tverrtøyningene er mer jevne enn normalt på denne prøve.

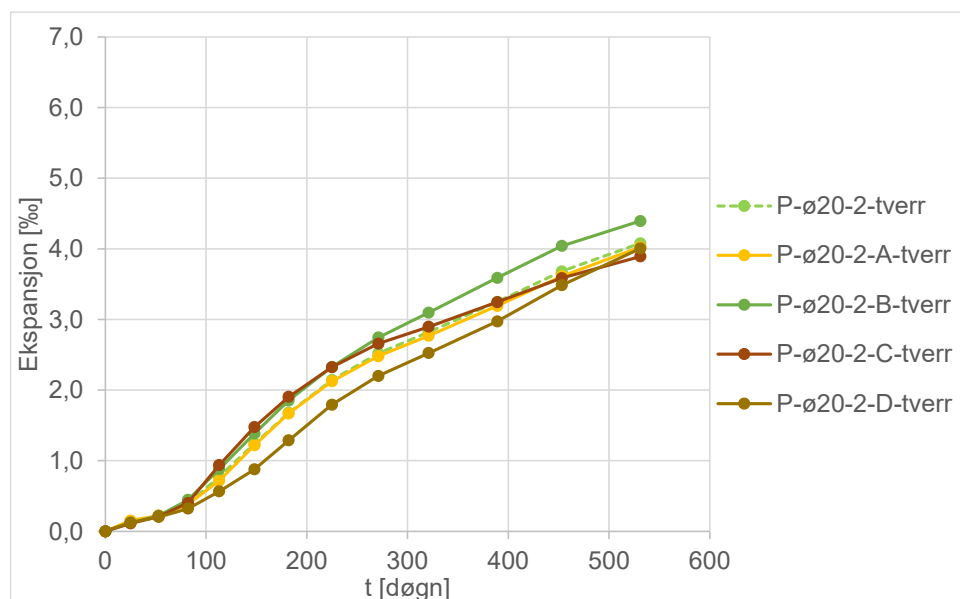
Tøyningene i lengde- og tverr-retningen er også stort likt innbyrdes plassert på denne prøven. Eneste avvik er mot slutten for flate C hvor tverrtøyningen blir mindre enn på flate B selv om lengdetøyningen på flate C fortsatt er høyest.



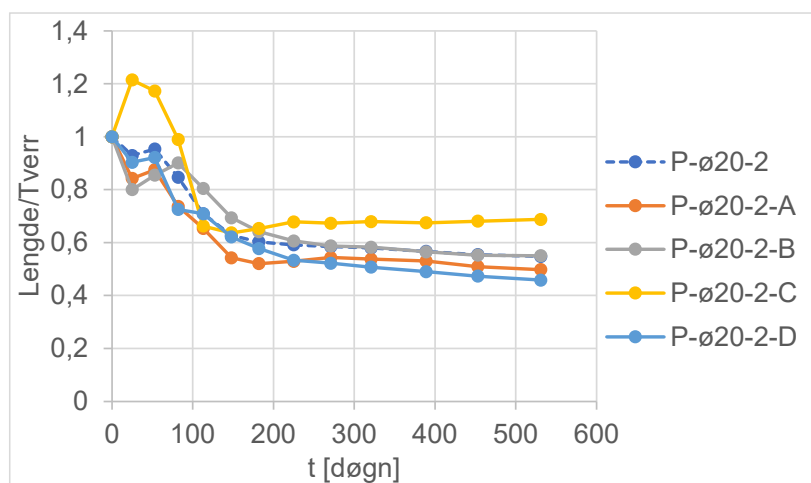
Figur D-2680: Ekspansjoner alle enkeltmålinger prisme P-ø20-2 frem til 200 døgn



Figur D-27: Ekspansjoner alle enkeltmålinger i lengderetning prisme P-ø20-2

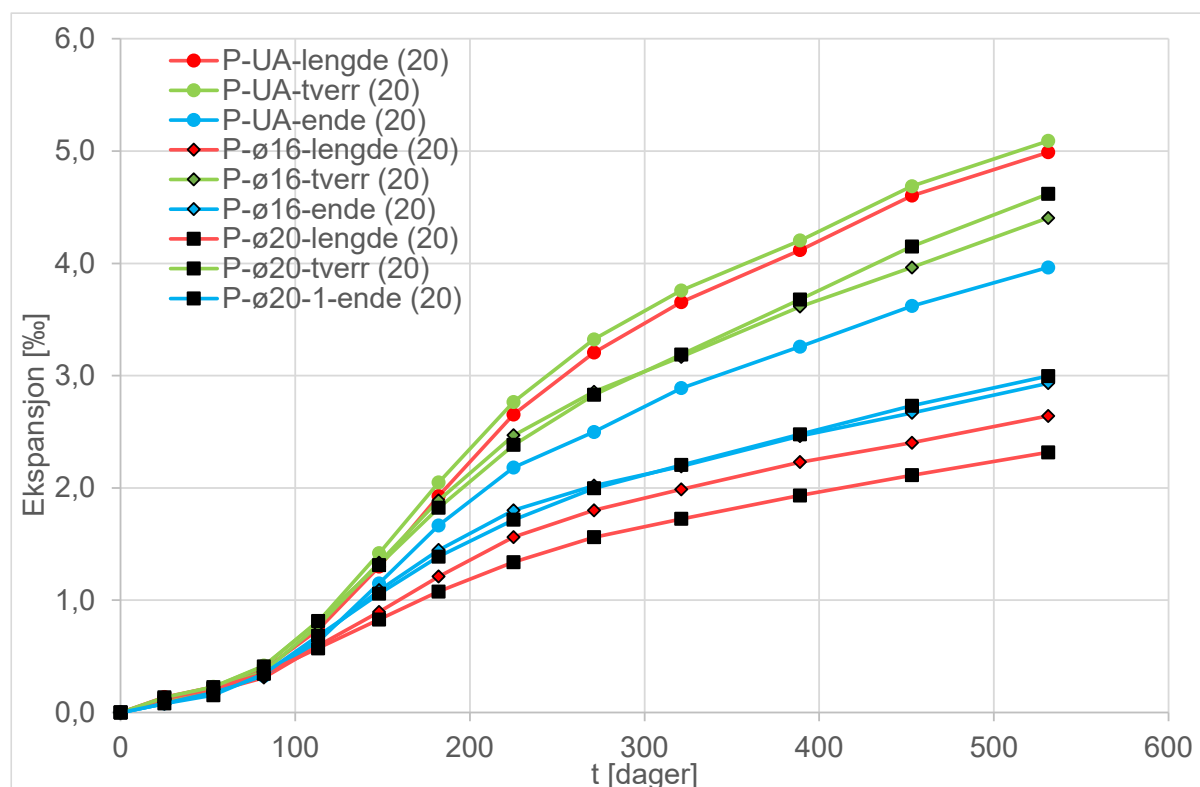


Figur D-2881: Ekspansjoner alle enkeltmålinger i tverretning prisme P-ø20-2

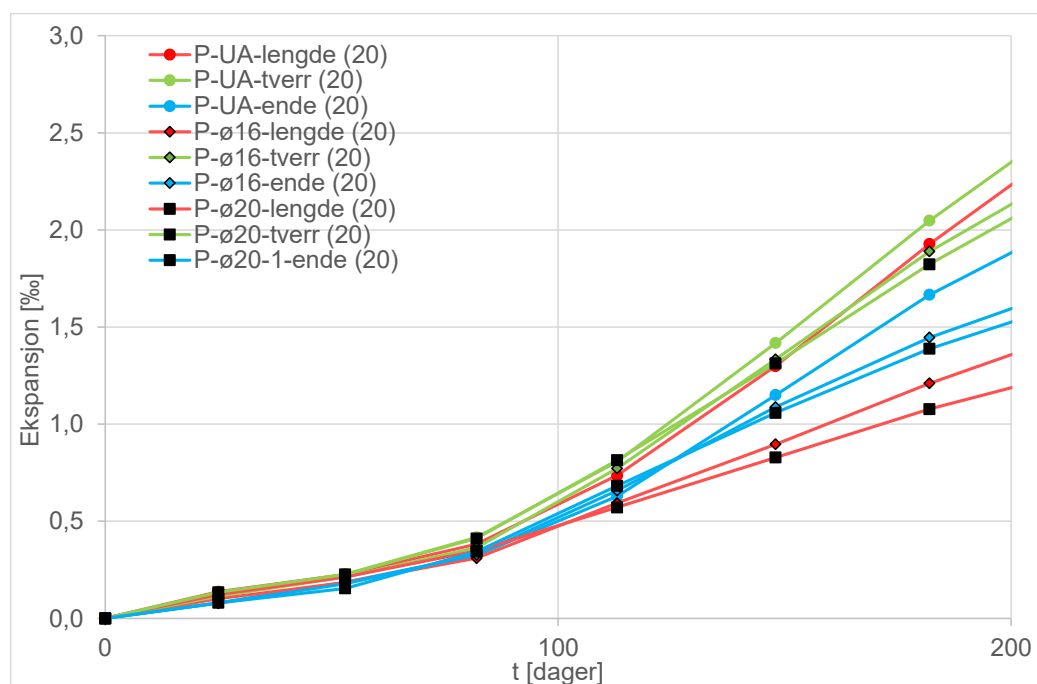


Figur D-29: Lengde/Tverr for prisme P-ø20-2 plottet mot antall døgn

D.4: Middelverdier



Figur D-30: Ekspansjoner middelverdier P-UA, P-ø16 og P-ø20 i lengde-, tverr- og enderetning



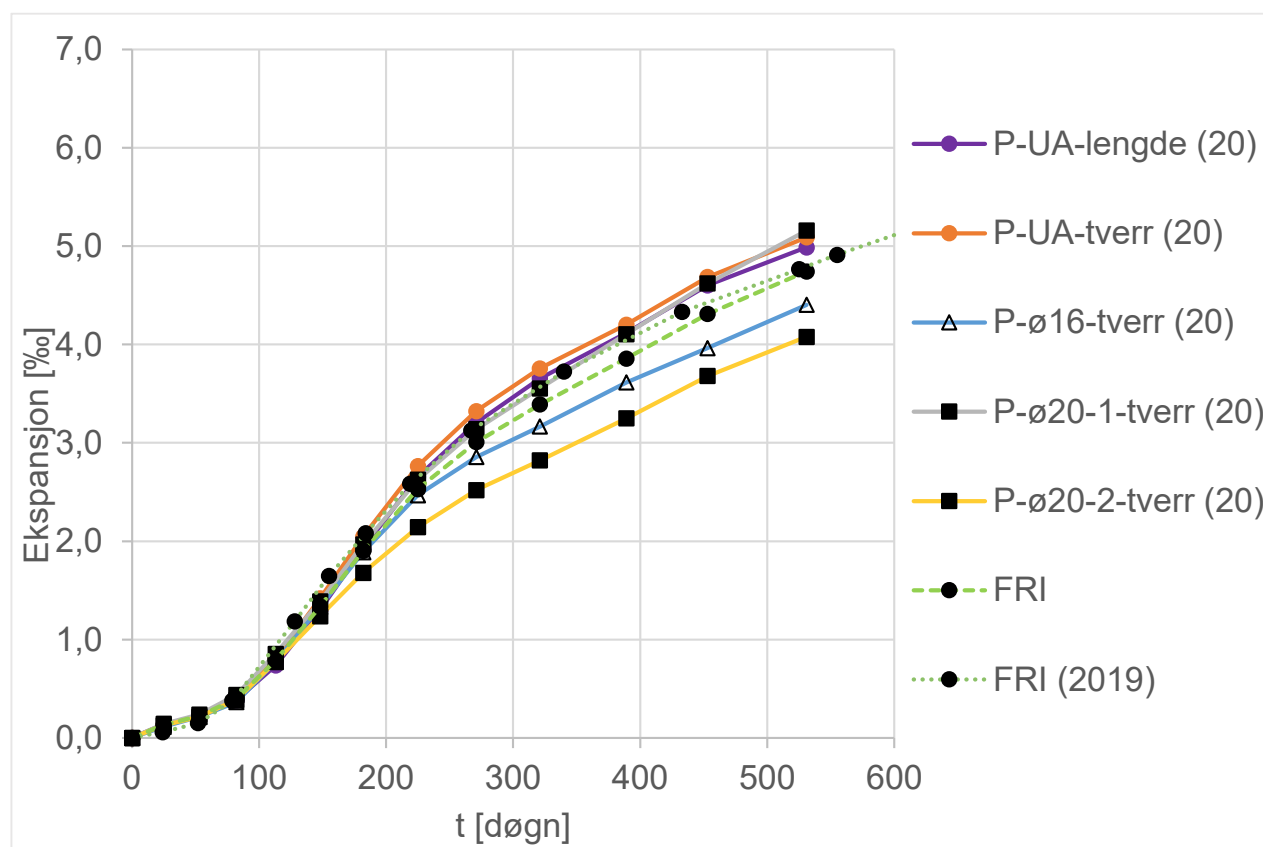
Figur D-3182: Ekspansjoner middelverdier P-UA, P-ø16 og P-ø20 i lengde-, tverr- og enderetning frem til 200 døgn

D.5: Fri ekspansjon

Middelverdien av 20 målinger. Alle retninger av prisme P-UA og tverretningene til prismene P-ø16, P-Ø20-1 og PØ20-2. Verdi fastholdt)/Fri, standardavviket og variasjonskoeffisienten for den fri ekspansjon er vist i Tabell D-13.

Tabell D-35: Fri ekspansjon, standardavvik, variasjonskoeffisient og forhold Fastholdt/Fri ekspansjon

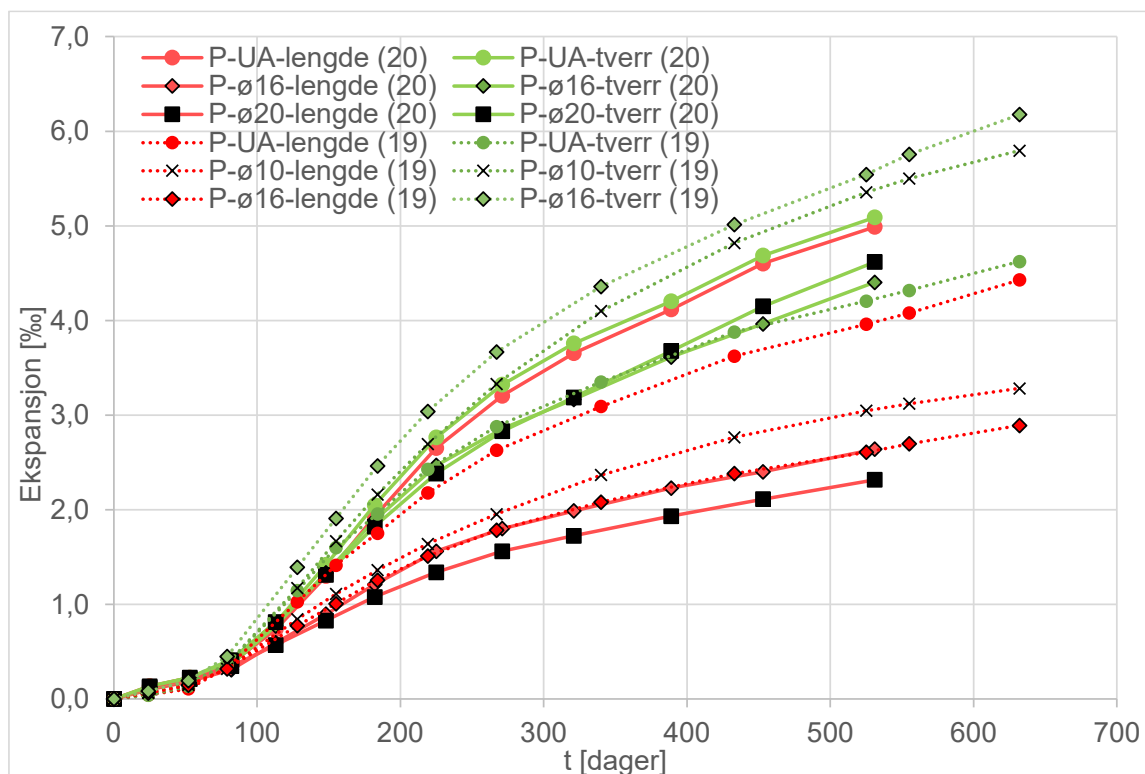
Døgn	FRI	Stdtddev	Var.coff	Fastholdt/Fri (ø16)	Fastholdt/Fri (ø20)
25	0,130	0,024	18,7	0,777	0,950
53	0,224	0,022	9,9	0,827	0,950
82	0,397	0,054	13,6	0,781	0,875
113	0,788	0,177	22,4	0,752	0,724
148	1,335	0,331	24,8	0,671	0,620
182	1,902	0,478	25,1	0,636	0,566
225	2,531	0,663	26,2	0,617	0,529
271	3,008	0,801	26,6	0,599	0,519
321	3,391	0,865	25,5	0,586	0,509
389	3,858	0,908	23,5	0,578	0,501
453	4,311	0,941	21,8	0,557	0,490
531	4,744	0,953	20,1	0,557	0,488



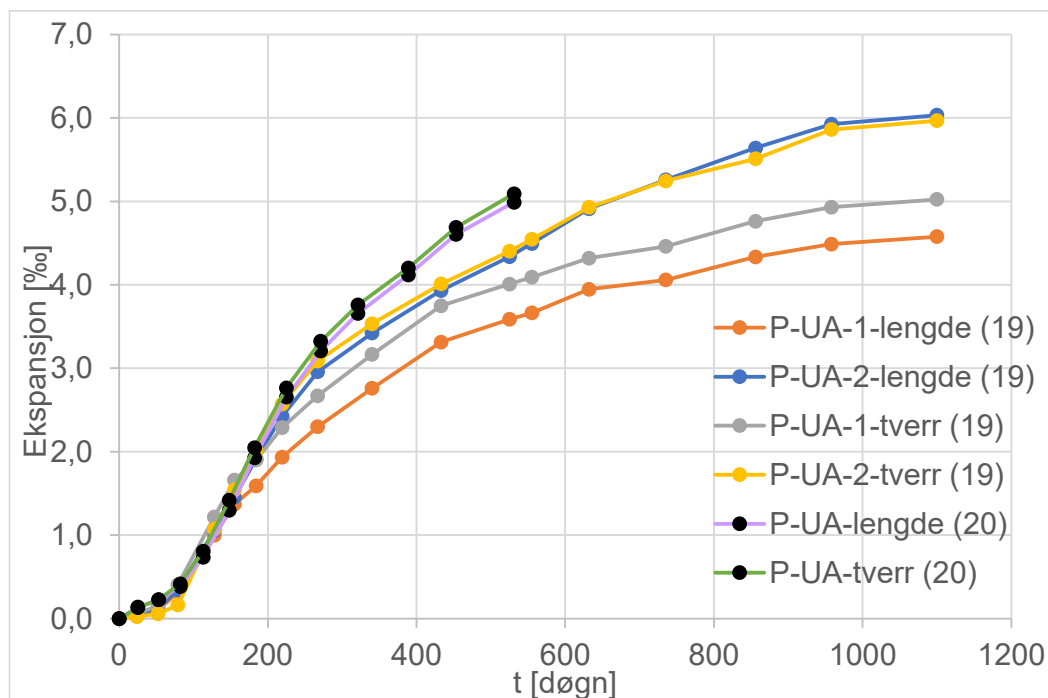
Figur D-32: Referanse fri retning for prismene fra 2019 og 2020 markert med grønn stiplet linje. Middelveridene til hvert prisme (fra 2020) i hver fri retning også vist.

D.6: Sammenligning med prismer fra 2019

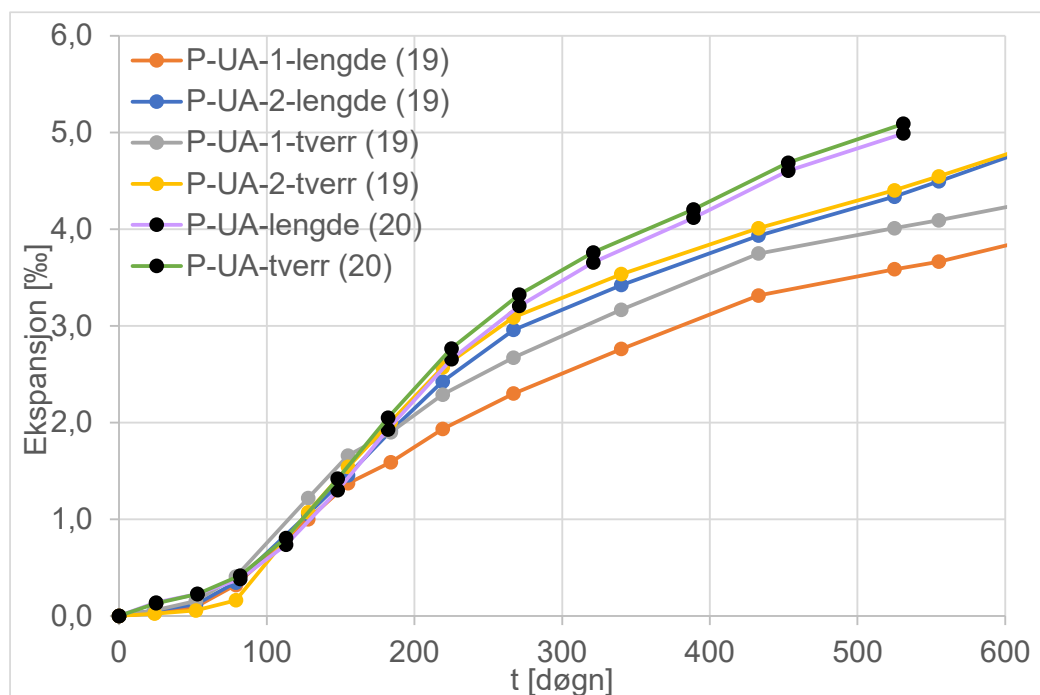
I Figur D-33 er middelerdien av alle prøvetypene vist. Stiplet linje er her prismene fra 2019. I de resterende figurene er de like prismene fra hver serie, P-UA og P-ø16, vist for seg. Her er de svarte markørene prismene fra 2020.



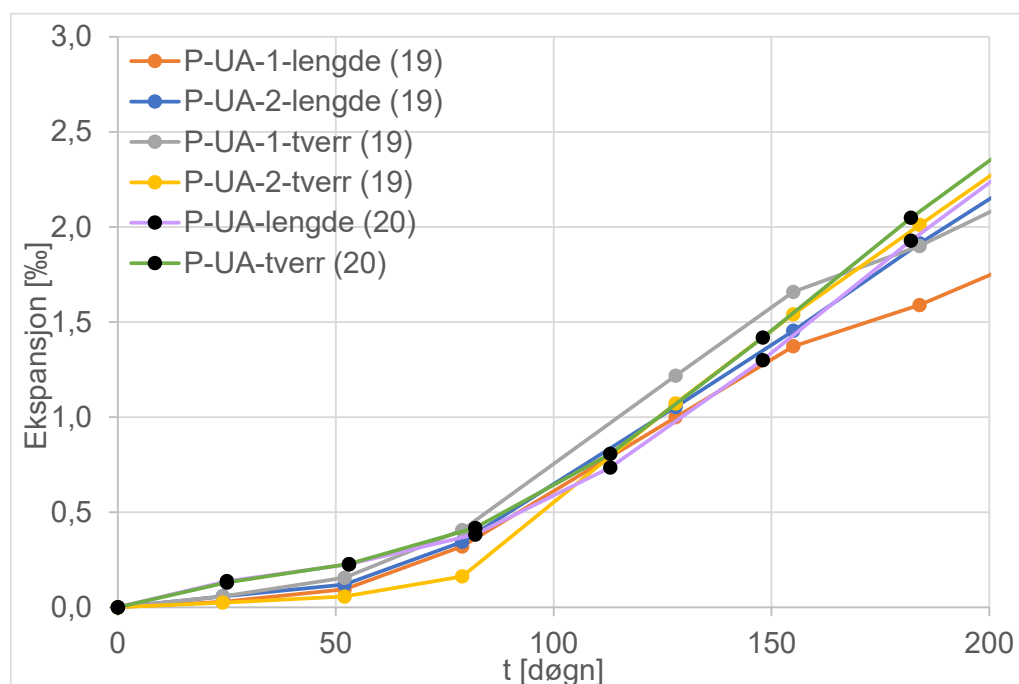
Figur D-3383: Middelerdien av alle prismer fra 2019 og 2020 i lengde- og tverrretning



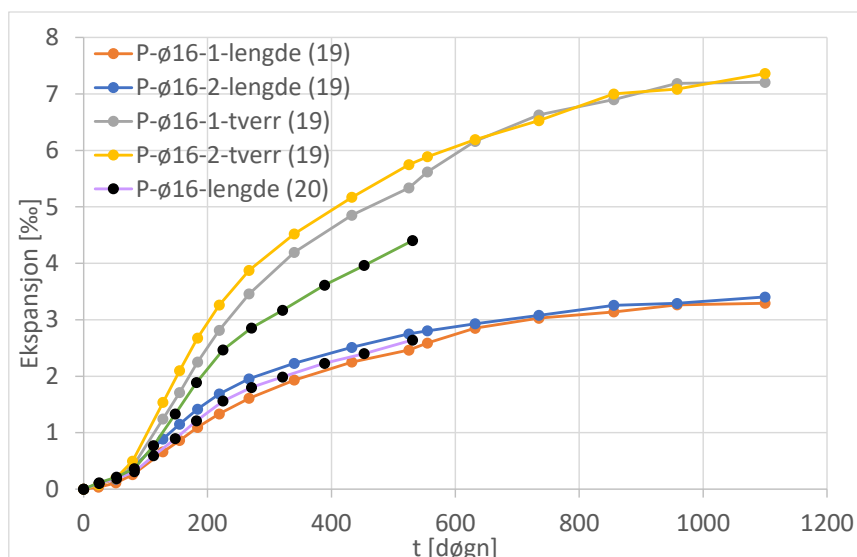
Figur D-3484: Middelerdien av uarmerte prismer fra 2019 og 2020 i lengde- og tverrretning



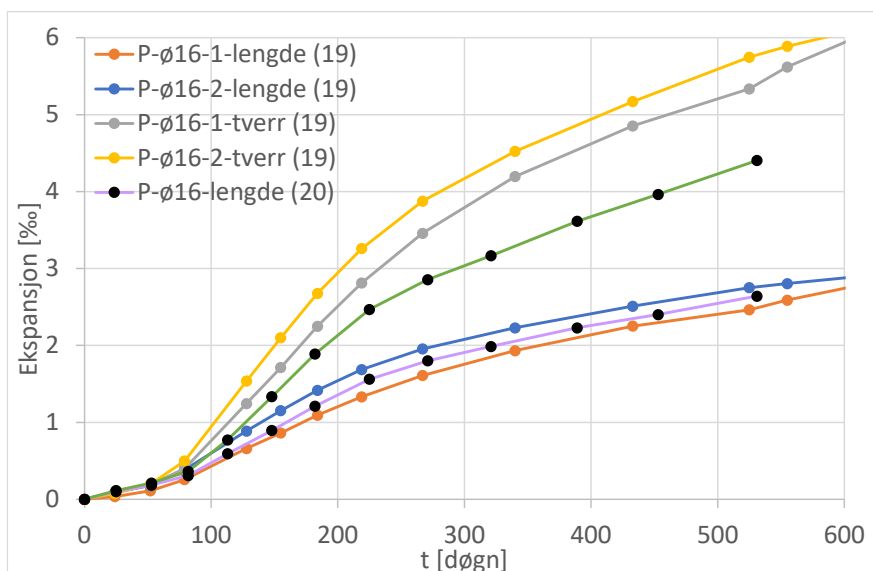
Figur D-3585: Middelverdier av uarmerte prismer fra 2019 og 2020 i lengde- og tverretning frem til 600 døgn



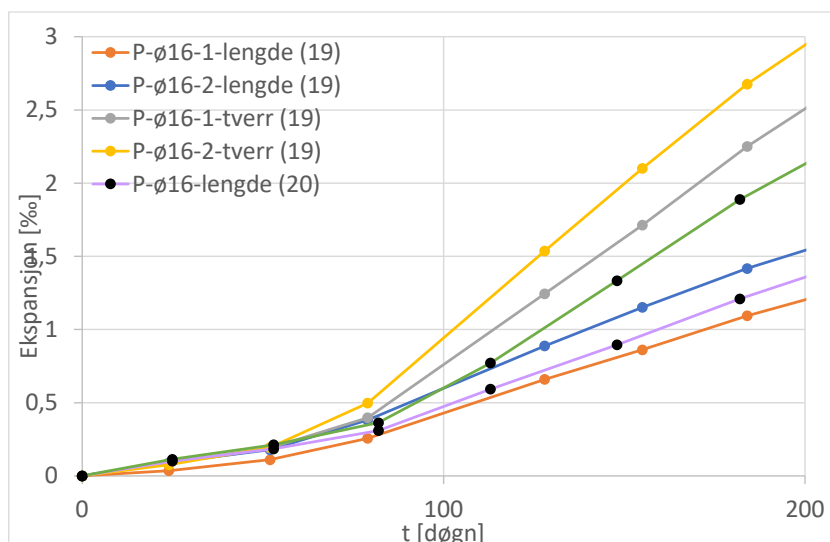
Figur D-3686: Middelverdier av uarmerte prismer fra 2019 og 2020 i lengde- og tverretning frem til 200 døgn



Figur D-3787: Middelverdier av prismer med 4ø16 mm stenger fra 2019 og 2020 i lengde- og tverrretning

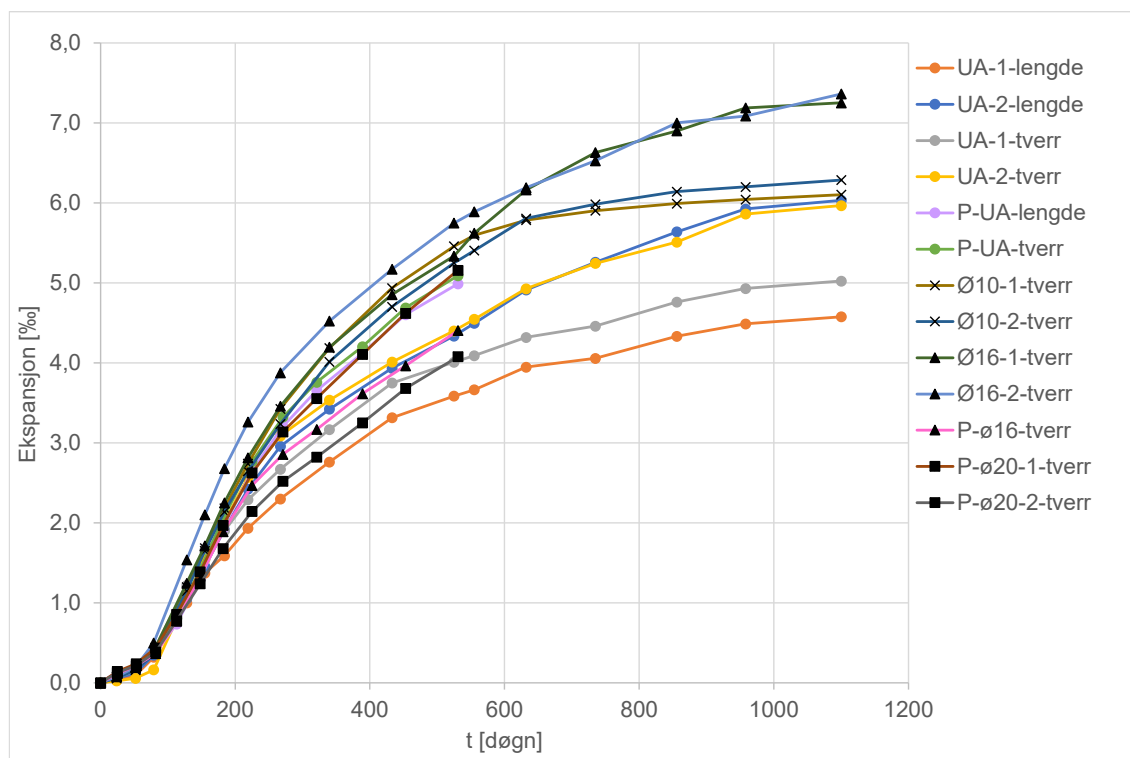


Figur D-3888: Middelverdier av prismer med 4ø16 mm stenger fra 2019 og 2020 frem til 600 døgn

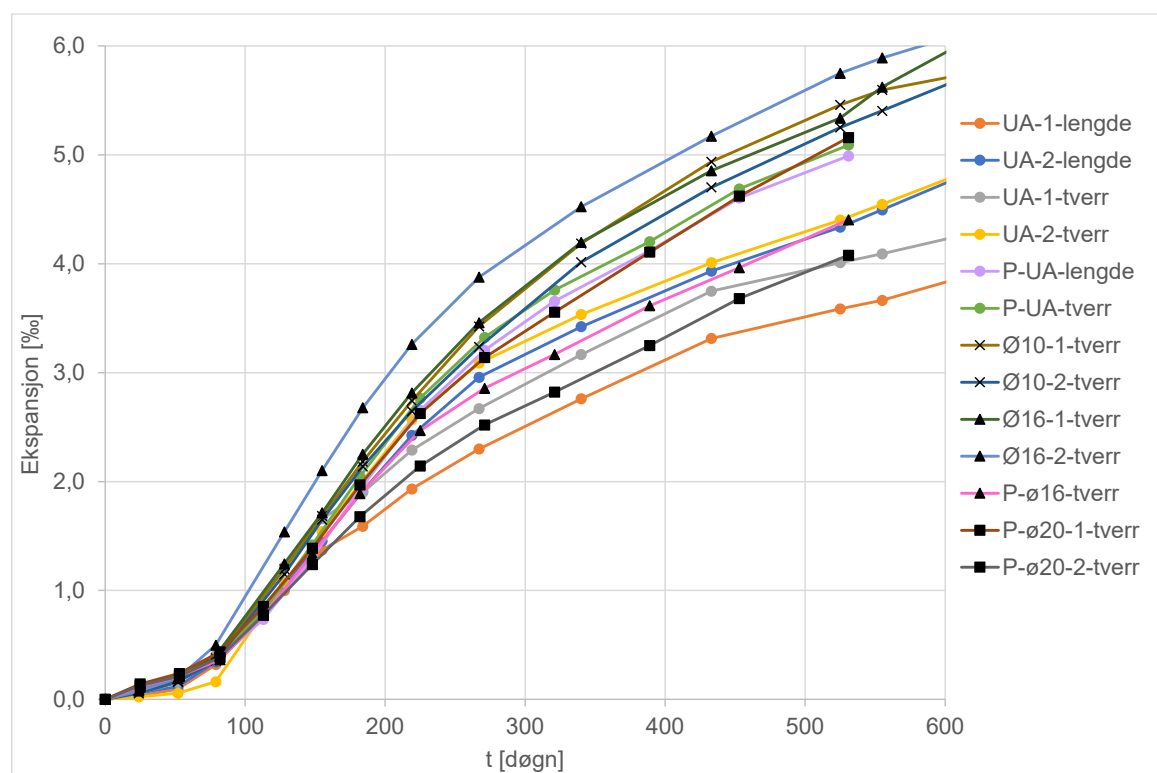


Figur D-3989: Middelverdier av prismene med 4ø16 mm stenger fra 2019 og 2020 frem til 200 døgn

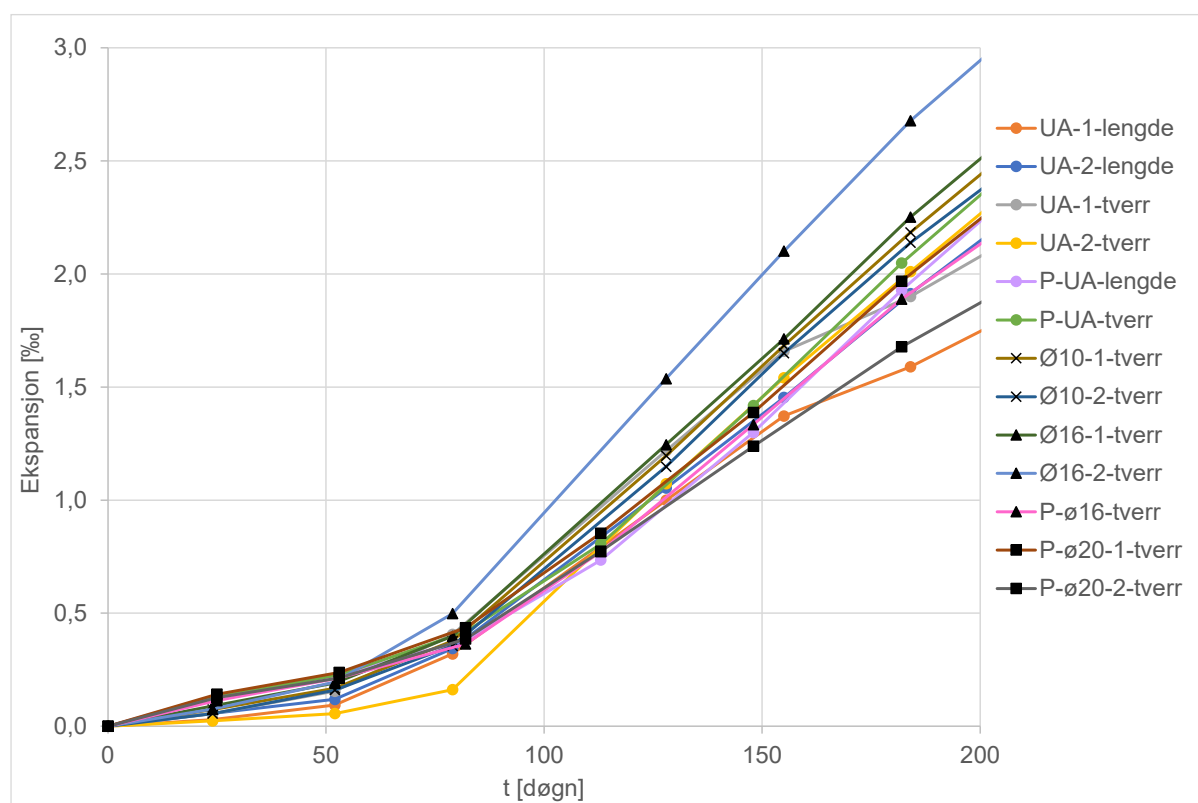
I Figur D-40 - 42 er alle de fire retningene fra begge seriene vist. Her er de linjene markert med P først prismene fra 2020.



Figur D-4090: Middelverdier av alle fri retninger på prismene fra 2019 og 2020



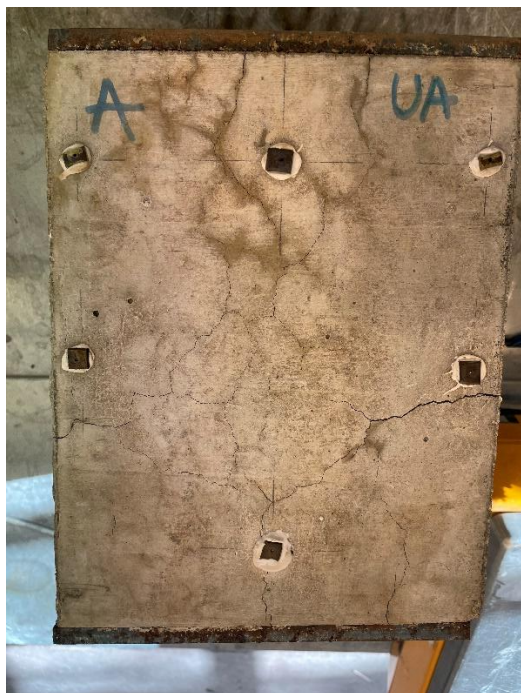
Figur D-41: Middelverdier av alle fri retninger på prismer fra 2019 og 2020 frem til 600 døgn



Figur D-4291: Middelverdier av alle fri retninger på prismer fra 2019 og 2020 frem til 200 døgn

D.6: Bilder

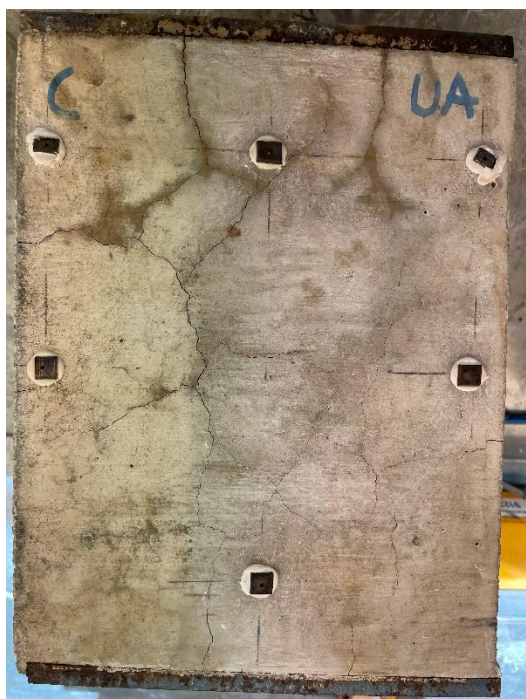
P-UA



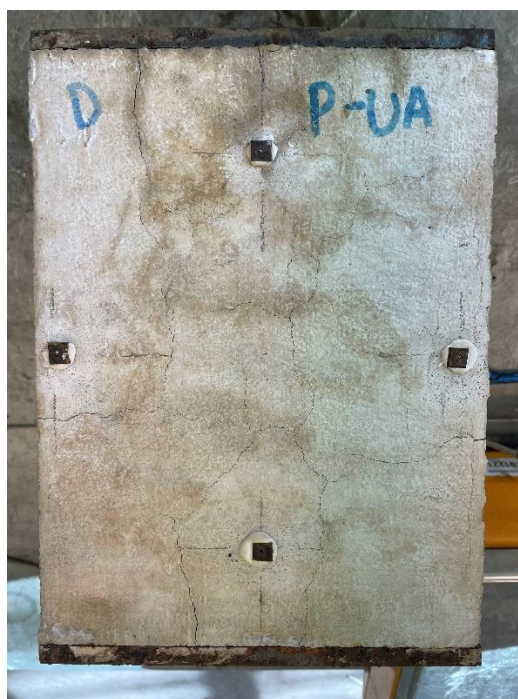
a) Side A



b) Side B



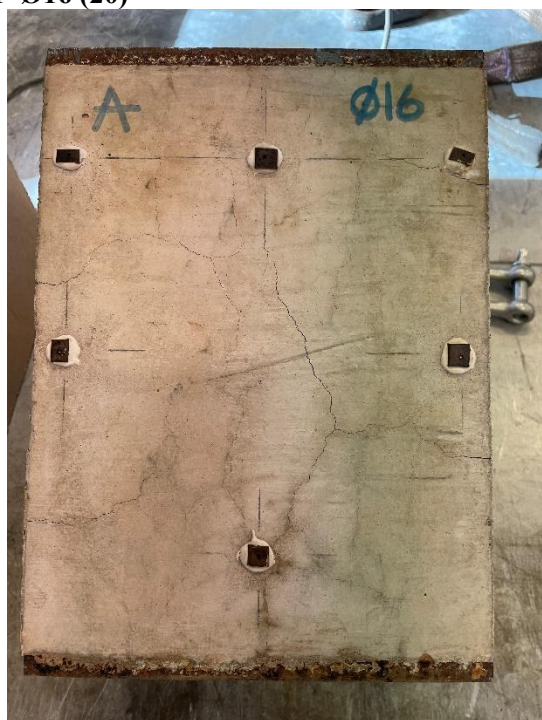
c) Side C



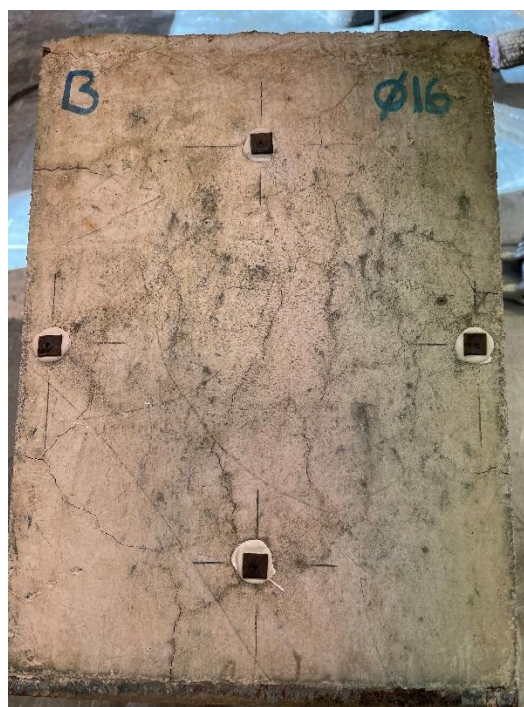
d) Side D

Figur D-43: P-UA (20)

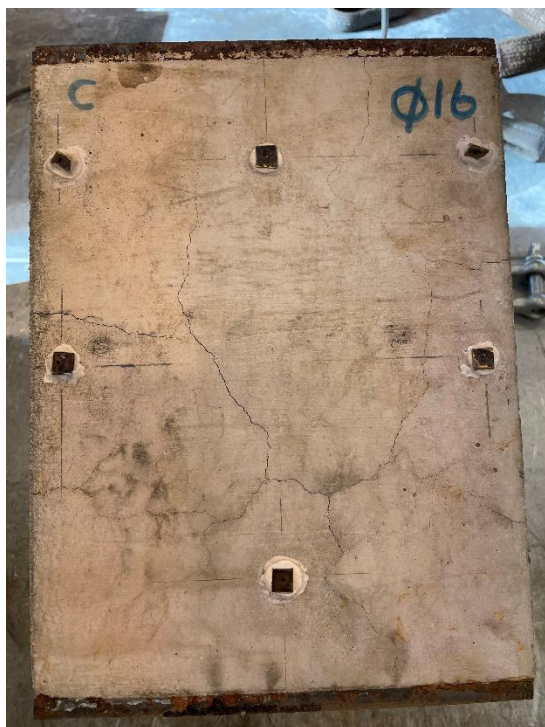
P-Ø16 (20)



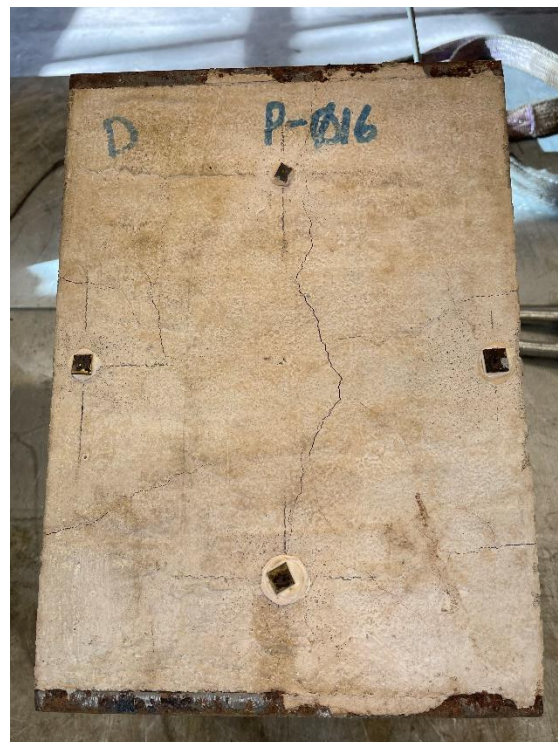
a) Side A



b) Side B



c) Side C



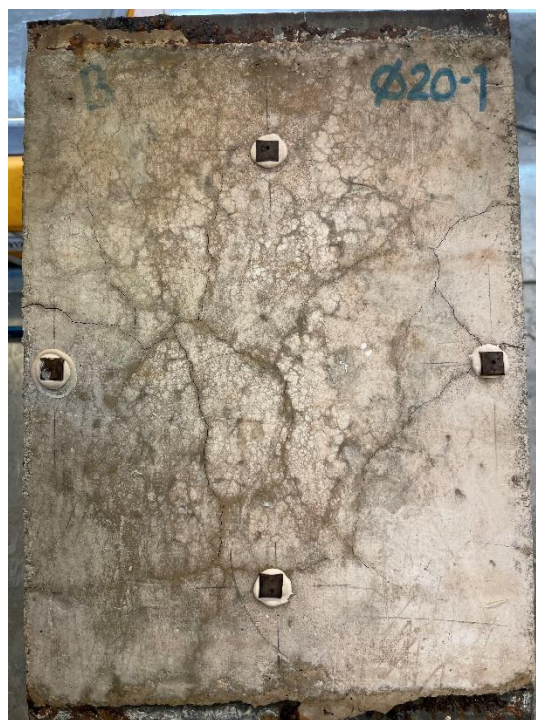
d) Side D

Figur D-44: P-Ø16 (20)

P-Ø20-1 (20)



a) Side A



b) Side B



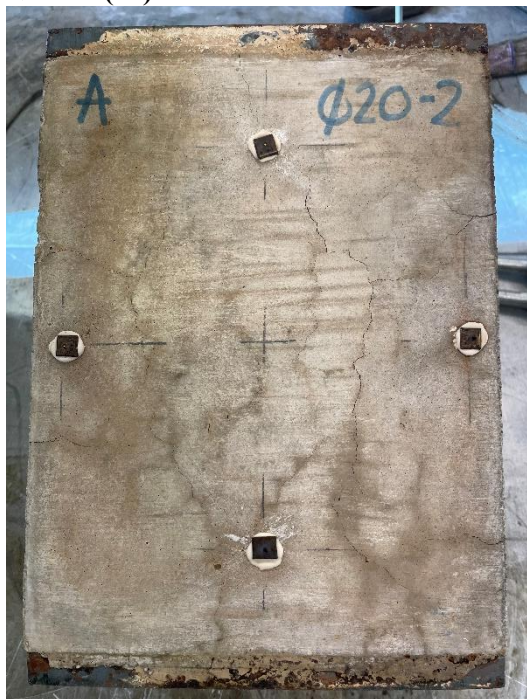
c) Side C



d) Side D

Figur D-45: P-Ø20-1 (20)

P-Ø20-2 (20)



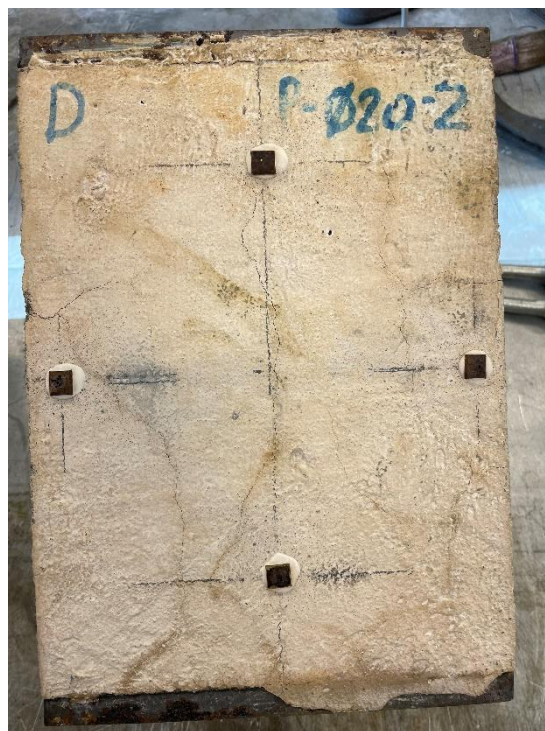
a) Side A



b) Side B



c) Side C



d) Side D

Figur D-46: P-Ø20-2 (20)

VEDLEGG E: ALLE EKSPANSJONSMÅLINGER

E.1 Kuber

Tabell E-1 og E-2 i vedlegg E viser gjennomsnittsmålingene for kubene fra 2019 og 2020 i de tre retningene etter avsluttet lagring/ekspandering og før utboring og prøving av kjerner. Kubene FC38-5, RC38-5, K38-1 og K38-2 ble lagret fuktig ved 20 °C (i bøttene, dvs. ved 100 % RF) etter uttaking fra 38 °C-rommet før det ble boret prøvestykker fra dem, antall døgn lagret ved 20 °C er vist i parentes. Antall døgn referansekubene er lagret ved 20 °C er også vist i parentes. Det er de siste målingene ved 20°C som da er gitt i tabellen. Da ekspansjonen i z-retning blir målt langs to målelinjer på samme side, som vist i figur 3-4 og 3-5 er det gjennomsnittet av disse som er vist i tabell 4-1 og 4-2. Hver målte sideflate har sin egen rad i begge tabeller. For de kubene der flere sideflater er målt er gjennomsnittet av disse også vist.

Tabell E-1: Ekspansjonsmålinger 230 mm kuber fra 2019

Prøvestykke/ Måleområde	Døgn lagret 38°C +	Ekspansjon [‰]			
		x-retning	y-retning	z-retning	V (x+y+z)
FC20-1	(90)	0,08	0,06	0,06	0,20
FC20-2	(140)	0,06	0,10	0,10	0,26
FC20-3	(200)	0,10	0,18	0,09	0,37
FC20-4	(426)	0,13	0,15	0,18	0,46
FC38-1	90	0,58	0,59	0,49	1,66
FC38-2	140	1,62	1,29	1,52	4,43
FC38-3	200	3,20	2,74	2,41	8,35
FC38-4	426	4,03	4,36	4,13	12,52
FC38-5-A	594 + (197)	4,27	4,09	4,24	
FC38-5-B	594 + (197)	4,02	2,10	3,18	
FC38-5-Gsnitt	594 + (197)	4,15	3,10	3,71	10,95
FC60-Gsnitt*	170**	3,27	2,74	2,82	8,83
RC38-1	90	0,55	0,54	0,30*	1,39
RC38-2	140	1,13	1,37	0,67*	3,17
RC38-3	200	1,93	1,68	0,79*	4,40
RC38-4	426	3,33	2,21	1,68*	7,22
RC38-5-A	594 + (197)	4,02	3,54	1,32*	
RC38-5-B	594 + (197)	3,91	3,09	1,14*	
RC38-5-Gsnitt	594 + (197)	3,97	3,32	1,23*	8,30

* Gjennomsnitt av to målinger på samme sideflate (z1 + z2), **Usikker sluttdato, varmeskap stoppet i ferien

Tabell E-2: Ekspansjonsmålinger 230 mm kuber fra 2020

Prøvestykke/ Måleområde	Døgn lagret 38°C +	Ekspansjon [‰]			V (x+y+z)
		x-retning	y-retning	z-retning	
K20-1-A	(217)	0,176	-	0,244	
K20-1-B	(217)	-	0,196	0,232	
K20-1-C	(217)	0,224	-	0,292	
K20-1-D	(217)	-	0,308	0,312	
K20-1-Gsnitt	(217)	0,200	0,252	0,270	0,722
K20-2-A	(541)	0,412	-	0,564	
K20-2-B	(541)	-	0,324	0,316	
K20-2-C	(541)	0,540	-	0,520	
K20-2-D	(541)	-	0,400	0,472	
K20-2-Gsnitt	(541)	0,476	0,362	0,468	1,306
K38-1-A	104 + (110)	0,996		1,084	
K38-1-B	104 + (110)		1,100	1,156	
K38-1-C	104 + (110)	1,316		1,412	
K38-1-D	104 + (110)		0,812	0,808	
K38-1-Gsnitt	104 + (110)	1,156	0,956	1,115	3,227
K38-2-A	133 + (81)	1,724	-	1,325	
K38-2-B	133 + (81)	-	1,480	1,100	
K38-2-C	133 + (81)	1,092	-	1,180	
K38-2-D	133 + (81)	-	1,928	1,252	
K38-2-Gsnitt	133 + (81)	1,408	1,704	1,214	4,326
K38-3-A	531 + (7)	4,196	-	3,780	
K38-3-B	531 + (7)	-	3,696	3,420	
K38-3-C	531 + (7)	3,708	-	3,860	
K38-3-D	531 + (7)	-	5,592	5,060	
K38-3-Gsnitt	531 + (7)	3,952	4,644	4,030	12,626
KB38-A	531 + (10)	3,990	-	1,000*	
KB38-B	531 + (10)	-	4,560	2,264*	
KB38-C	531 + (10)	4,647	-	0,700*	
KB38-D	531 + (10)	-	5,430	1,808*	
KB38-Gsnitt	531 + (10)	4,319	4,995	1,443	10,757

*Gjennomsnitt av to målinger på samme sideflate (z1 + z2)

E.2 Sylindere

Tabell E-3 i vedlegg E viser de resulterende ekspansjonsmålingene til hver ø150x300 mm sylinder diamentralt og i lengderetning etter endt lagring/ekspandering og før SDT-testing.

Tabell E-3: Ekspansjonsmålinger ø150x300 mm sylindere

Prøvestykk e	Døgn lagret 38°C +	Ekspansjon [‰]	
		Lengderetning	Diamentralt
S20-1	(90)	0,17	0,26
S20-2	(90)	0,17	0,03
S20-3	(426)	0,30	0,90
S20-4	(426)	0,33	0,97
S38-1	140	1,52	1,85
S38-2	140	1,36	1,50
S38-3	200	2,21	4,05
S38-4	200	2,44	2,90
S38-5	426	3,46	5,78
S38-6	426	3,85	5,94

E.3 Prismer

Tabell E-4 og E-5 viser de resulterende ekspansjonsmålingene til hvert prisme fra 2019 og 2020 i lengde- og tverretning. Prismene er lagret ved 38°C/100%RF i henholdsvis 1100 og 531 døgn. For prismene fra 2020 er også målingene ved endeflatene på tvers av armeringsretningen vist. Hver sideflate er vist på en egen rad i tabellen. Gjennomsnittet av flatene for hvert prisme er også vist. Enkeltmålingene er vist i vedlegg C og D.

Tabell E-4: Ekspansjonsmålinger prismer fra 2019

Prøvestykke	Døgn lagret	Ekspansjon [‰]		V
		Lengderetnin	Tverretning	
P-UA-1-A	1100	4,34	4,856	
P-UA-1-B	1100	4,62	5,048	
P-UA-1-C	1100	4,75	5,94	
P-UA-1-D	1100	4,61	4,248	
P-UA-1-	1100	4,58	5,02	14,62
P-UA-2-A	1100	5,47	6,57	
P-UA-2-B	1100	5,66	5,59	
P-UA-2-C	1100	6,71	6,10	
P-UA-2-D	1100	6,29	5,61	
P-UA-2-	1100	6,03	5,97	17,97
P-ø10-1-A	1100	2,84	7,15	
P-ø10-1-B	1100	3,16	4,94	
P-ø10-1-C	1100	3,14	7,19	
P-ø10-1-D	1100	3,37	5,13	
P-ø10-1-	1100	3,13	6,10	15,33
P-ø10-2-A	1100	4,02	5,92	
P-ø10-2-B	1100	3,87	6,18	
P-ø10-2-C	1100	3,17	6,89	
P-ø10-2-D	1100	3,92	6,15	
P-ø10-2-	1100	3,75	6,29	16,32
P-ø16-1-A	1100	3,53	8,20	
P-ø16-1-B	1100	2,57	5,09	
P-ø16-1-C	1100	4,00	9,64	
P-ø16-1-D	1100	3,08	6,07	
P-ø16-1-	1100	3,29	7,21	17,80
P-ø16-2-A	1100	3,83	8,71	
P-ø16-2-B	1100	3,18	6,58	
P-ø16-2-C	1100	3,48	7,84	
P-ø16-2-D	1100	3,12	6,32	
P-ø16-2-	1100	3,40	7,36	18,13

Tabell E-5: Ekspansjonsmålinger prismer fra 2020

Prøvestykke	Døgn lagret	Ekspansjon [‰]			V
		Lengderetni	Tverretnin	End	
P-UA-A	531	5,62	5,10	3,87	
P-UA-B	531	5,85	6,48	-	
P-UA-C	531	5,14	4,62	4,05	
P-UA-D	531	3,35	4,16	-	
P-UA-Gsnitt	531	4,99	5,09	3,96	15,17
P-ø16-A	531	3,08	3,68	3,38	
P-ø16-B	531	2,61	5,79	-	
P-ø16-C	531	2,57	4,03	2,47	
P-ø16-D	531	2,30	4,12	-	
P-ø16-	531	2,64	4,40	2,93	11,45
P-ø20-1-A	531	2,68	4,86	2,43	
P-ø20-1-B	531	2,83	5,97	-	
P-ø20-1-C	531	2,03	6,14	3,55	
P-ø20-1-D	531	2,06	3,67	-	
P-ø20-1-	531	2,40	5,16	2,99	12,72
P-ø20-2-A	531	2,00	4,02		
P-ø20-2-B	531	2,42	4,39		
P-ø20-2-C	531	2,68	3,89		
P-ø20-2-D	531	1,84	4,00		
P-ø20-2-	531	2,23	4,08		10,39

VEDLEGG F: SDT RESULTATER

Tabell F-1, F-2, F-3 og F-4 i vedlegg F viser ulike resultater fra SDT-prøving av ø95x190 mm kjerner fra henholdsvis 2019-kuber, 2020-kuber, 2019-prismer og 2020-prismer. I tabell F-1 er også resultater fra tilsvarende prøving av støpte Ø150x300 mm sylindere inkludert. Resultatene som er vist er sekant E-modulen ved på- og avlastning av sykel en og fem, SDI, SDI-2, alternativ SDI, tøyningen ved maks last på første last-sykel, $\epsilon_{topp,1}$, PDI og NLI. Lastnivået i prosent fra trykkfasthet funnet ved testing av arbeidsdiagram/statisk test etter endt SDT-prøving er også vist. Resultatene fra disse testene er vist i avsnitt 5,4. De ulike prøvenes ekspansjon er også gitt. Ekspansjonen til de borede sylindrene er lik den målt på overflaten til de tilhørende kubene og prismene i boreretningen. For de støpte ø150x300 sylindrene er ekspansjonen lik den målt i lengderetning.

Tabell F-1: Resultater fra SDT på ø95x190 mm sylindere boret ut fra kuber og ø150x300 mm sylindre fra 2019

Prøve	ϵ_{AR} [%]	$E_{opp,1}$ [MPa]	$E_{ned,1}$ [MPa]	$E_{opp,5}$ [MPa]	$E_{ned,5}$ [MPa]	SDI	SDI ₂	SDI _{alt}	$\epsilon_{topp,1}$ [%]	PDI	NLI	Lastnivå [%]
1 termin (90 døgn)												
FC20-1-Z1	0,06	29236	32726	31632	31856	0,10	0,08	0,48	0,737	0,192	1,071	46,6
FC20-1-Z2	0,06	28439	32029	31078	31260	0,11	0,09	0,51	0,755	0,197	1,066	47,7
FC38-1-Z1	0,5	23267	29376	28449	28573	0,14	0,11	0,68	0,912	0,275	1,075	46,7
FC38-1-Z2	0,5	23802	29782	28906	29071	0,14	0,11	0,66	0,898	0,269	1,047	43,9
RC38-1-Z1	0,3	27306	30725	30270	30336	0,10	0,08	0,50	0,782	0,173	1,062	46,4
RC38-1-Z2	0,3	27394	31264	30404	30490	0,11	0,11	0,53	0,782	0,197	1,054	45,5
RC38-1-Y1	0,5	26616	30877	30270	30219	0,11	0,09	0,54	0,809	0,206	1,046	47,8
RC38-1-Y2	0,5	24668	29696	29009	29094	0,12	0,09	0,59	0,863	0,236	1,043	47,3
S20-1	0,14	33361	35061	33923	33929	0,08	0,07	0,40	0,650	0,079	1,068	42,0
S20-2	0,14	33867	35688	34705	34790	0,08	0,07	0,37	0,640	0,086	1,056	40,7
2 termin (140 døgn)												
FC20-2-Z1	0,09	31276	33817	32469	32720	0,12	0,08	0,58	0,683	0,156	1,074	51,3
FC20-2-Z2	0,09	30609	33187	31716	31961	0,10	0,08	0,48	0,697	0,152	1,085	50,8
FC38-2-Z1	1,5	17321	24196	23293	23558	0,20	0,15	0,93	1,219	0,348	1,063	50,7
FC38-2-Z2	1,5	16949	24139	22947	23264	0,19	0,14	0,86	1,247	0,362	1,068	55,1
RC38-2-Z1	0,7	23322	28020	26973	27118	0,13	0,11	0,64	0,910	0,231	1,070	52,0
RC38-2-Z2	0,7	25409	29697	28580	28764	0,12	0,10	0,57	0,841	0,215	1,047	49,4
RC38-2-Y1	1,40	20669	27412	26492	26826	0,17	0,12	0,77	1,025	0,308	1,061	47,3
RC38-2-Y2	1,40	20014	26697	25760	25996	0,18	0,14	0,82	1,056	0,314	1,064	47,7
S38-1	1,4	17225	23368	23368	22770	0,23	0,18	1,04	1,321	0,295	1,125	46,6
S38-2	1,4	18118	23919	22912	23343	0,21	0,17	0,99	1,248	0,274	1,031	44,3
3 termin (270 døgn)												
FC20-3-Z1	0,12	32622	34884	33890	34082	0,08	0,06	0,39	0,660	0,137	1,067	47,6
FC20-3-Z2	0,12	30982	33381	32364	32516	0,08	0,07	0,41	0,696	0,149	1,055	47,3
FC38-3-Z1	2,40	15679	22088	21142	21221	0,22	0,17	0,99	1,355	0,349	1,075	51,3
FC38-3-Z2	2,40	14855	21124	20122	20401	0,23	0,18	1,04	1,430	0,361	1,093	53,1
RC38-3-Z1	0,80	22473	27148	26204	26349	0,14	0,11	0,68	0,955	0,238	1,050	51,7
RC38-3-Z2	0,80	23363	28111	27020	27144	0,14	0,11	0,65	0,920	0,239	1,048	50,5

RC38-3-Y1	1,70	18476	25038	23972	24084	0,19	0,15	0,87	1,156	0,326	1,067	48,8
RC38-3-Y2	1,70	16911	23153	22193	22439	0,20	0,15	0,92	1,261	0,331	1,064	48,1
S38-3	2,20	16753	20779	19748	19930	0,22	0,20	1,07	1,229	0,220	1,044	-
S38-4	2,20	14709	20641	19575	19752	0,25	0,19	1,13	1,460	0,332	1,076	46,0
Prøve 60 °C (170 døgn)												
FC60-1-Z1	2,80	14202	18283	17155	17332	0,20	0,16	0,95	1,493	0,285	1,184	55,3
FC60-1-Z2	2,80	14248	18371	17175	17436	0,20	0,17	0,96	1,493	0,291	1,182	58,6
4 termin (426 døgn)												
FC20-4-Z1	0,15	32639	35206	34207	34363	0,08	0,07	0,39	0,700	0,152	0,923	41,9
FC20-4-Z2	0,15	31750	34394	33312	33456	0,08	0,07	0,41	0,719	0,156	1,060	42,3
FC38-4-Z1	4,1	15183	20545	19110	19450	0,23	0,19	1,06	1,503	0,337	1,162	56,3
FC38-4-Z2	4,1	13997	19463	18026	18371	0,25	0,21	1,16	1,631	0,357	1,194	55,6
RC38-4-Z1	1,68	23423	27481	26407	26586	0,13	0,11	0,64	0,975	0,220	1,075	47,0
RC38-4-Z2	1,68	23290	27506	26242	26459	0,14	0,12	0,68	0,983	0,230	1,070	47,1
RC38-4-Y1	2,25	15861	21623	20303	20665	0,22	0,17	1,00	1,441	0,340	1,133	48,8
RC38-4-Y2	2,25	15666	21633	20404	20670	0,22	0,18	1,03	1,458	0,348	1,120	53,0
S38-5	3,7	14680	19579	17989	18405	0,27	0,23	1,26	1,590	0,304	1,267	55,9
S38-6	3,7	13976	18976	17377	17786	0,27	0,22	1,27	1,663	0,312	1,196	54,2
S20-3	0,3	33802	35753	34588	34815	0,09	0,08	0,42	0,681	0,098	1,061	39,5
S20-4	0,3	33980	35863	34914	35124	0,08	0,07	0,39	0,681	0,098	1,054	38,6
5 termin (594 døgn + 277 i 20°C)												
FC38-5-Y1	3,20	20024	23482	22188	22268	0,16	0,13	0,78	1,141	0,215	0,984	50,5
FC38-5-Y2	3,20	19181	22548	21324	21340	0,16	0,13	0,78	1,193	0,209	0,981	51,1
RC38-5-Z1	1,40	25894	28270	27476	27480	0,11	0,08	0,53	0,884	0,129	1,094	44,4
RC38-5-Z2	1,40	24397	27321	26252	26402	0,12	0,10	0,59	0,932	0,166	1,090	44,5
RC38-5-Y1	3,45	19432	23204	22381	22631	0,16	0,13	0,77	1,152	0,242	1,115	49,7
RC38-5-Y2	3,45	17430	21987	20618	20955	0,19	0,16	0,91	1,284	0,290	1,130	49,1

Tabell F-2: Resultater fra SDT på ø95x190 mm sylindre boret ut fra kuber fra 2020

Prøve	ε _{AR} [%]	E _{opp1} [MPa]	E _{ned1} [MPa]	E _{opp5} [MPa]	E _{ned5} [MPa]	SDI	SDI ₂	SDI _{alt}	ε _{topp,1} [%]	PDI	NLI	Lastnivå [%]
K20-1-y1	0,25	30900	31554	31282	31084	0,08	0,05	0,39	0,548	0,063	1,078	45,0
K20-1-y2	0,25	30432	30774	30719	30423	0,04	0,03	0,22	0,556	0,037	1,063	41,6
K20-2-z1	0,47	23643	27376	26109	26415	0,14	0,12	0,68	0,713	0,206	1,097	38,2
K20-2-z2	0,47	23857	27718	26571	26743	0,14	0,12	0,68	0,707	0,207	1,080	38,5
K38-1-y1	0,96	22376	26299	25568	25531	0,13	0,10	0,64	0,759	0,227	1,114	41,8
K38-1-y2	0,96	23763	27359	26595	26613	0,12	0,09	0,58	0,715	0,196	1,116	41,4
K38-2-y1	1,70	19497	25619	24017	24301	0,19	0,16	0,90	0,871	0,337	1,153	45,1
K38-2-y2	1,70	18408	23983	22631	23025	0,20	0,16	0,93	0,921	0,327	1,177	46,6
K38-3-z1	4,03	13643	18293	16823	17138	0,25	0,22	1,19	1,234	0,319	1,187	50,3
K38-3-z2	4,03	12782	17394	15913	16095	0,27	0,23	1,26	1,317	0,332	1,218	52,0
KB38-y1	5,00	11998	17092	15586	15928	0,28	0,23	1,29	1,404	0,360	1,193	55,2
KB38-y2	5,00	11497	16435	15082	15375	0,28	0,24	1,30	1,465	0,360	1,177	50,6
KB38-z1	1,44	22010	24866	23956	24087	0,14	0,12	0,70	0,765	0,174	1,091	41,2
KB38-z2	1,44	22392	25516	24512	24759	0,14	0,12	0,69	0,752	0,185	1,071	40,2

Tabell F-3: Resultater fra SDT-testing på $\varnothing 95 \times 150$ mm sylindre boret ut fra prismer fra 2019

Prøve	ϵ_{AR} [%]	E_{opp1} [MPa]	E_{ned1} [MPa]	E_{opp5} [MPa]	E_{ned5} [MPa]	SDI	SDI ₂	SDI _{alt}	$\epsilon_{topp,1}$ [%]	PDI	NLI	Lastnivå [%]
P-UA-1	4,33	16381	20230	19150	19306	0,20	0,17	0,94	1,396	0,241	1,125	51,6
P-UA-2	5,64	15738	19656	18506	18726	0,21	0,18	0,99	1,455	0,254	1,133	58,2
P- $\varnothing 10$ -1	3,08	20225	24352	23369	23505	0,16	0,14	0,76	1,131	0,219	1,039	46,8
P- $\varnothing 10$ -2	3,69	19222	23373	22336	22327	0,17	0,14	0,82	1,188	0,224	1,034	46,9
P- $\varnothing 16$ -1	3,14	21856	25314	24488	24488	0,14	0,12	0,68	1,045	0,182	1,026	45,9
P- $\varnothing 16$ -2	3,26	21065	24407	23776	23776	0,15	0,13	0,71	1,085	0,181	1,013	45,0

Tabell F-4: Resultater fra SDT-testing på $\varnothing 95 \times 150$ mm sylindre boret ut fra prismer fra 2020

Prøve	ϵ_{AR} [%]	E_{opp1} [MPa]	E_{ned1} [MPa]	E_{opp5} [MPa]	E_{ned5} [MPa]	SDI	SDI ₂	SDI _{alt}	$\epsilon_{topp,1}$ [%]	PDI	NLI	Lastnivå [%]
P-UA	4,99	12025	16105	14778	15016	0,26	0,22	1,23	1,402	0,317	1,238	51,9
P- $\varnothing 16$	2,64	18950	22484	21653	21742	0,16	0,14	0,78	0,890	0,217	1,051	42,5
P- $\varnothing 20$ -1	2,4	20728	24117	23322	23420	0,15	0,13	0,71	0,812	0,197	1,027	39,4
P- $\varnothing 20$ -2	2,23	19591	23044	22243	22253	0,15	0,13	0,75	0,860	0,209	1,025	42,0

Gjennomsnittlige skadeparametere fra SDT (vist i tabell F-1 til F-4); reduksjon av E-modul, E/E_{ref} , SDI, SDI₂, SDI_{alt}, $\Delta E_5 - E_1$, $\epsilon_{topp,1}$, NLI og PDI for de ulike prøvetypene er vist i tabell F-5 og F-6 for prøver fra 2019 og 2020. For prøvene bore fra kubene er hvert punkt gjennomsnittet av to prøver. For de støpte $\varnothing 150 \times 300$ mm sylindrene og sylindrene boret fra prismene er det kun resultatene fra en prøve. Reduksjonen av E-modul er gitt som gjennomsnittlig sekant E-modul av femte av og på-lasting ($E_{opp,5}$ og $E_{ned,5}$) delt på en referanse E-modul. Referanse E-modulen til prøvene fra 2019 er lik 34000 MPa, mens for prøvene fra 2020 er den lik 32000 MPa.

Tabell F-5: Gjennomsnittlige resultater - skadeparametere fra SDT fra prøver fra 2019

Prøve	t [døgn]	ϵ_{AR} [%]	SDI	SDI-2	SDI-alt	E/E _{ref}	$\Delta E_5 - E_1$	$\epsilon_{stopp,1}$ [%]	PDI	NLI
FC20	(90)	0,06	0,10	0,08	0,50	0,93	0,083	0,746	0,194	1,069
	(140)	0,09	0,11	0,08	0,53	0,95	0,040	0,690	0,154	1,079
	(270)	0,12	0,08	0,07	0,40	0,98	0,043	0,678	0,143	1,061
	(426)	0,15	0,08	0,07	0,40	1,00	0,048	0,710	0,154	0,991
FC38	90	0,49	0,14	0,11	0,67	0,85	0,181	0,905	0,272	1,061
	140	1,52	0,20	0,15	0,90	0,68	0,264	1,233	0,355	1,066
	270	2,41	0,22	0,17	1,01	0,61	0,264	1,393	0,355	1,084
	426	4,13	0,24	0,20	1,11	0,55	0,222	1,567	0,347	1,178
	594 +	3,10	0,16	0,13	0,78	0,64	0,100	1,167	0,212	0,982
RC38-Y	90	0,54	0,12	0,09	0,56	0,87	0,135	0,836	0,221	1,044
	140	1,37	0,17	0,13	0,79	0,77	0,226	1,041	0,311	1,062
	270	1,68	0,19	0,15	0,90	0,68	0,237	1,208	0,328	1,065
	426	2,21	0,22	0,17	1,02	0,60	0,231	1,449	0,344	1,126
	594 +	3,26	0,19	0,15	0,84	0,62	0,150	1,218	0,266	1,123
RC38-Z	90	0,30	0,11	0,09	0,51	0,89	0,10	0,782	0,185	1,058
	140	0,67	0,13	0,10	0,61	0,82	0,14	0,876	0,223	1,059
	270	0,79	0,14	0,11	0,65	0,78	0,14	0,836	0,221	1,044
	426	1,68	0,14	0,11	0,66	0,78	0,12	0,979	0,225	1,072
	594 +	1,30	0,11	0,09	0,56	0,79	0,07	0,908	0,147	1,092
FC60	170	2,80	0,20	0,17	0,96	0,51	0,18	1,493	0,288	1,183
S20	(90)	0,14	0,08	0,07	0,39	1,01	0,021	0,645	0,082	1,062
	(426)	0,30	0,08	0,07	0,40	1,03	0,028	0,681	0,098	1,058
S38	140	1,40	0,22	0,18	1,01	0,68	0,235	1,284	0,285	1,078
	270	2,20	0,23	0,20	1,10	0,58	0,204	1,345	0,276	1,060
	426	3,70	0,27	0,23	1,27	0,53	0,199	1,627	0,308	1,231
P-UA	1100	4,33	0,20	0,17	0,94	0,57	0,15	1,396	0,241	1,125
	1100	5,64	0,21	0,18	0,99	0,55	0,15	1,455	0,254	1,133
P-ø10	1100	3,08	0,16	0,14	0,76	0,69	0,14	1,131	0,219	1,039
	1100	3,69	0,17	0,14	0,82	0,66	0,14	1,188	0,224	1,034
P-ø16	1100	3,14	0,14	0,12	0,68	0,72	0,10	1,045	0,182	1,026
	1100	3,26	0,15	0,13	0,71	0,70	0,10	1,085	0,181	1,013

Tabell F-6: Gjennomsnittlige resultater - skadeparametere fra SDT fra prøver fra 2020

Prøve	t [døgn]	ε_{AR} [‰]	SDI	SDI-2	SDI-alt	E/E _{ref}	$\Delta E_5 - E_1$	$\varepsilon_{topp,1}$ [‰]	PDI	NLI
K20	(217)	0,25	0,06	0,04	0,30	0,96	0,01	0,552	0,050	1,071
	(541)	0,47	0,14	0,12	0,68	0,83	0,10	0,710	0,206	1,089
K38	104 + (110)	0,96	0,13	0,10	0,61	0,81	0,12	0,737	0,212	1,115
	133 + (81)	1,70	0,19	0,16	0,91	0,73	0,19	0,896	0,332	1,165
	531	4,03	0,26	0,22	1,23	0,52	0,20	1,276	0,325	1,202
KB38-y	531	5,00	0,28	0,23	1,28	0,48	0,10	1,435	0,360	1,185
KB38-z	531	1,44	0,13	0,12	0,70	0,76	0,20	0,759	0,180	1,081
P-UA	531	4,99	0,26	0,22	1,23	0,47	0,193	1,402	0,317	1,238
P-ø16	531	2,64	0,16	0,14	0,78	0,68	0,127	0,890	0,217	1,051
P-ø20	531	2,40	0,146	0,13	0,71	0,73	0,113	0,812	0,197	1,027
	531	2,23	0,154	0,14	0,75	0,70	0,119	0,860	0,209	1,025

VEDLEGG G: RESULTATER ARBEIDSDIAGRAM OG TRYKKFASTHET

Tabell G-1 viser resultater fra arbeidsdiagram fra de samme sylindrene som er testet for SDT. Trykkfasthet, tøyning ved maks last, ϵ_{peak} og sekant E-modulen ved 40 % av maks last for prøvene, E_{arb} , er vist i tabellen. Noen av prøvene fikk problemer med tøyningmålingene, men fastheten er fremdeles funnet fra arbeidsdiagrammet. Dette gjelder S38-1, S38-2, S38-4, RC38-5-y1 og RC38-5-y2. Prøve S38-3 hadde feil ved målingen, mens RC38-4-y1 ble testet statisk. Tabell G-2 viser resultatene til prøvene som er testet for trykkfasthet statisk til brudd uten arbeidsdiagram.

Tabell G-1: Resultater fra arbeidsdiagram på $\varnothing 95 \times 190$ mm sylindere boret ut fra kuber og $\varnothing 150 \times 300$ mm sylindere fra 2019 og 2020

Prøve	ϵ_{AR}	f_c	ϵ_{peak} [‰]	E_{arb} [MPa]
1 termin (90 døgn)				
FC20-1-Z1	0,06	46,2	2,65	23298
FC20-1-Z2	0,06	45,1	2,61	23234
FC38-1-Z1	0,50	46,2	2,81	21399
FC38-1-Z2	0,50	49,2	2,89	21592
RC38-1-Z1	0,30	46,4	2,64	23042
RC38-1-Z2	0,30	47,5	2,66	23582
RC38-1-Y1	0,50	45,2	2,48	23222
RC38-1-Y2	0,50	45,4	2,60	22318
S20-1	0,14	51,9	2,55	26378
S20-2	0,14	53,6	2,57	26336
2 termin (140 døgn)				
FC20-2-Z1	0,09	42,0	2,32	24450
FC20-2-Z2	0,09	42,4	2,33	24304
FC38-2-Z1	1,50	42,5	2,81	17863
FC38-2-Z2	1,50	39,1	2,69	17427
RC38-2-Z1	0,70	41,4	2,60	20385
RC38-2-Z2	0,70	43,6	2,46	22379
RC38-2-Y1	1,40	45,5	2,89	19663
RC38-2-Y2	1,40	47,7	2,98	18880
S38-1	1,40	49,3		
S38-2	1,40	51,5		
3 termin (270 døgn)				
FC20-3-Z1	0,12	45,9	2,30	25040
FC20-3-Z2	0,12	45,9	2,44	23060
FC38-3-Z1	2,40	42,3	3,12	15384
FC38-3-Z2	2,40	40,9	3,02	14586
RC38-3-Z1	0,80	41,9	2,44	20128
RC38-3-Z2	0,80	43,0	2,55	20454

RC38-3-Y1	1,70	44,5	3,03	17650
RC38-3-Y2	1,70	45,1	3,12	16041
S38-3	2,20	-		
S38-4	2,20	47,2		
Prøve 60 °C (170 døgn)				
FC60-1-Z1	2,80	39,3	3,70	12762
FC60-1-Z2	2,80	37,0	3,40	13270
4 termin (426 døgn)				
FC20-4-Z1	0,15	54,5	2,66	25732
FC20-4-Z2	0,15	54,0	2,60	25901
FC38-4-Z1	4,10	40,5	3,41	14046
FC38-4-Z2	4,1	41,0	3,64	13466
RC38-4-Z1	1,68	48,6	2,90	19615
RC38-4-Z2	1,68	48,5	2,86	19380
RC38-4-Y1	2,25	46,8*		
RC38-4-Y2	2,25	43,1	3,41	14848
S38-5	3,7	41,8	3,75	13436
S38-6	3,7	42,9	3,78	13840
S20-3	0,3	58,3	2,77	23865
S20-4	0,3	60,0	2,74	25640
5 termin (594 døgn + 277 i 20°C)				
FC38-5-Y1	3,10	45,3	3,34	17427
FC38-5-Y2	3,10	44,8	3,42	17262
RC38-5-Z1	1,30	51,6	2,78	21505
RC38-5-Z2	1,30	51,1	2,83	20739
RC38-5-Y1	3,30	45,0		
RC38-5-Y2	3,30	45,6		
2020-Kuber				
K20-1-y1	0,25	37,7	2,40	22908
K20-1-y2	0,25	40,8	2,55	23776
K38-1-Y1	0,96	40,6	2,92	19759
K38-1-Y2	0,96	41,1	2,96	20002
K38-2-Y1	1,70	37,6	2,89	17734
K38-2-Y2	1,70	36,4	2,96	16871

Tabell G-2: Resultater fra statisk testing av trykkfasthet på Ø95x190 mm sylindere boret fra kuber og prizmer fra 2019 og 2020

Prøve	ϵ_{AR}	f_c
2020-		
K20-2-z1	0,47	44,2
K20-2-z2	0,47	43,7
K38-3-z1	4,03	33,5
K38-3-z2	4,03	32,4
KB38-y1	5,00	30,5
KB38-y2	5,00	33,3
KB38-z1	1,44	40,9
KB38-z2	1,44	41,9
2019-Prizmer		
UA-1	4,33	44,3
UA-2	5,64	39,4
Ø10-1	3,08	48,6
Ø10-2	3,69	48,8
Ø16-1	3,14	49,8
Ø16-2	3,26	50,8
2020-Prizmer		
P-UA	4,99	32,5
P-Ø16	2,64	39,7
P-Ø20-1	2,4	42,7
P-Ø20-2	2,23	40,1

De gjennomsnittlige skadeparameterne fra arbeidsdiagram og statisk testing av trykkfasthet er vist i tabell G-3 og G-4 for prøvene fra henholdsvis 2019 og 2020. Som for de gjennomsnittlige skadeparameterne fra SDT, vist i Vedlegg F, er hvert punkt fra sylindrene boret fra kuber et gjennomsnitt av to prøver, mens hvert punkt fra de støpte Ø150x300 mm sylindrene og prismene er resultatet fra en prøve. Tabellen viser forholdet mellom fastheten og en referanse fasthet, $f_c/f_{c,ref}$, toppptøyningen, ϵ_{peak} og forholdet mellom sekant E-modulen ved 40 % av maks last og en referansefasthet for denne verdien, $E_{arb}/E_{arb,ref}$.

Gjennomsnittlig 28 døgns sylindetrykkfasthet var lik 54,1 MPa ($0,8 \cdot f_{c,terning}$) og 43,2 MPa for henholdsvis 2019- og 2020-serien. En referanseverdi for trykkfasthet er vanskeligere å bestemme da prøvene vil få en økning i fasthet. Denne økningen er større for prøver lagret ved høyere temperaturer. Da vi ikke har noen referanse (prøve uten AR) lagret ved 38 °C er det vanskelig å bestemme hvor mye større fastheten er ved 38 °C. I tabell 5-10 og 5-11 er reduksjonen i fasthet på grunn av AR, $f_c/f_{c,ref}$, beregnet både ut fra 28-døgnsverdiene til de to seriene og en økning i fasthet for prøvene funnet fra terninger lagret ved 20 °C. Denne økningen i fasthet for 2019-serien er vist i figur 5-30, mens den for 2020-serien er vist i Rapport 534 [15]. Disse terningene er lagret i bøttene sammen med referanse kubene for 2019-serien og i vannbad for 2020-serien. Det er også mulig at prøvene får en litt lavere fasthet ved at de testes etter SDT og ved at noen av prøvene er testet for arbeidsdiagram. Påvirkning av SDT og hastighet ved testing av fasthet er diskutert litt nærmere i avsnitt 5.6.1.

Referanse-E-modulen fra arbeidsdiagram er valgt til 25000 og 24000 MPa for prøvene fra henholdsvis 2019 og 2020- Dette er den høyeste verdien funnet fra referanseprøvene lagret ved 20 °C.

Tabell G-3: Skadeparametere fra arbeidsdiagram/statisk test av trykkfasthet for prøver fra 2019

Prøve	t [døgn]	ϵ_{AR} [‰]	$f_c/f_{c,ref}$ (28-døgn)	$f_c/f_{c,ref}$ (just)	ϵ_{peak} [‰]	$E_{arb}/E_{arb,ref}$
FC20	(90)	0,06	0,85	0,77	2,629	0,93
	(140)	0,09	0,78	0,70	2,328	0,98
	(270)	0,12	0,85	0,73	2,372	0,96
	(426)	0,15	1,00	0,84	2,630	1,03
FC38	90	0,49	0,88	0,81	2,851	0,86
	140	1,52	0,76	0,67	2,749	0,71
	270	2,41	0,77	0,66	3,069	0,60
	426	4,13	0,76	0,63	3,526	0,55
	594 + (197)	3,10	0,76	0,70	3,379	0,69
RC38-Y	90	0,54	0,84	0,77	2,541	0,91
	140	1,37	0,86	0,77	2,937	0,77
	270	1,68	0,83	0,71	3,072	0,67
	426	2,21	0,83	0,70	3,415	0,59
	594 +	3,26	0,84	0,70	-	-
RC38-Z	90	0,30	0,87	0,80	2,653	0,93
	140	0,67	0,79	0,70	2,530	0,86
	270	0,79	0,79	0,68	2,496	0,81
	426	1,68	0,90	0,75	2,883	0,78
	594 +	1,30	0,95	0,80	2,804	0,84
FC60	170	2,80	0,71	0,61	3,550	0,52
S20	(90)	0,14	0,98	0,89	2,564	1,05
	(426)	0,30	1,10	0,92	2,754	0,99
S38	140	1,40	0,93	0,83	-	-
	270	2,20	0,87	0,75	-	-
	426	3,70	0,78	0,66	3,762	0,55
Kun f_c						
P-UA	1100	4,33	0,82	0,69	-	-
	1100	5,64	0,73	0,61	-	-
P-ø10	1100	3,08	0,90	0,75	-	-
	1100	3,69	0,90	0,76	-	-
P-ø16	1100	3,14	0,92	0,77	-	-
	1100	3,26	0,94	0,79	-	-

Tabell G-4: Skadeparametere fra arbeidsdiagram/statisk test av trykkfasthet for prøver fra 2020

Prøve	t [døgn]	ϵ_{AR} [%]	$f_c/f_{c,ref}$ (28-døgn)	$f_c/f_{c,ref}$ (just)	ϵ_{peak} [%]	$E_{arb}/E_{arb,ref}$
K20	(217)	0,25	0,91	0,79	2,477	0,97
K38	104 +	0,96	0,95	0,82	2,942	0,83
	133 +	1,70	0,86	0,75	2,922	0,72
Kun fc (Statisk test)						
K20	(541)	0,47	1,02	0,81	-	-
K38	531	4,03	0,77	0,61	-	-
K38-3-	531	5,00	0,74	0,59	-	-
K38-3-	531	1,44	0,96	0,76	-	-
P-UA	531	4,99	0,76	0,60	-	-
P-ø16	531	2,64	0,92	0,73	-	-
P-ø20-1	531	2,40	0,99	0,79	-	-
P-ø20-2	531	2,23	0,93	0,74	-	-

Trykkfasthet ble testet på alle støpte terninger fra 2019. Terningene ble testet ved 28-døgn og ved alle fire prøveterminene som vist i figur 3-2. Alle bruddspenningene, beregnede sylindrefastheter og datoer for testing er vist i tabell G-5. Terningene ble lagret i samme bølge som kubene som er nevnt i tabellen. Unntaket er terningene benyttet til 28-døgnsfasthet som er lagret i vann ved 20°C før testing.

Tabell G-5: Trykkfasthet, $f_{c,terning}$, av 100 mm terninger fra 2019-serien

Merke	Tilhørende kube	Dato	$f_{c,terning}$	$f_{c,sylinder}$ ($f_{c,terning} \cdot 0,8$)
28 døgn				
3	28 døgn	29.jan	69,6	55,7
6	28 døgn	29.jan	67,5	54,0
8	28 døgn	29.jan	65,7	52,6
1 termin (90 døgn)				
15	FC20-1	29.apr	73,7	59,0
21	FC20-1	29.apr	73,5	58,8
24	FC20-1	29.apr	73,9	59,1
7	FC38-1	29.apr	75,2	60,1
11	FC38-1	29.apr	75,1	60,1
26	FC38-1	29.apr	73,9	59,2
2 termin (140 døgn)				
23	FC20-2	19.jun	75,1	60,1
25	FC20-2	19.jun	76,3	61,0
4	FC38-2	19.jun	68,3	54,6
5	FC38-2	19.jun	68,3	54,7
17	FC38-2	19.jun	66,2	53,0
3 termin (270 døgn)				
18	FC20-3	14.aug	78,4	62,7
19	FC20-3	14.aug	78,8	63,0
10	FC38-3	14.aug	68,1	54,4
12	FC38-3	14.aug	65,5	52,4
16	FC38-3	14.aug	67,5	54,0
4 termin (426 døgn)				
8	FC20-4	30.mar	65,7	52,6
13	FC20-4	30.mar	83,2	66,5
1	FC38-4	30.mar	68,6	54,9
2	FC38-4	30.mar	65,9	52,7
27	FC38-4	30.mar	64,5	51,6
Prøve 60°C (170 døgn)				
20	FC60	14.aug	76,9	61,6
22	FC60	14.aug	75,1	60,1

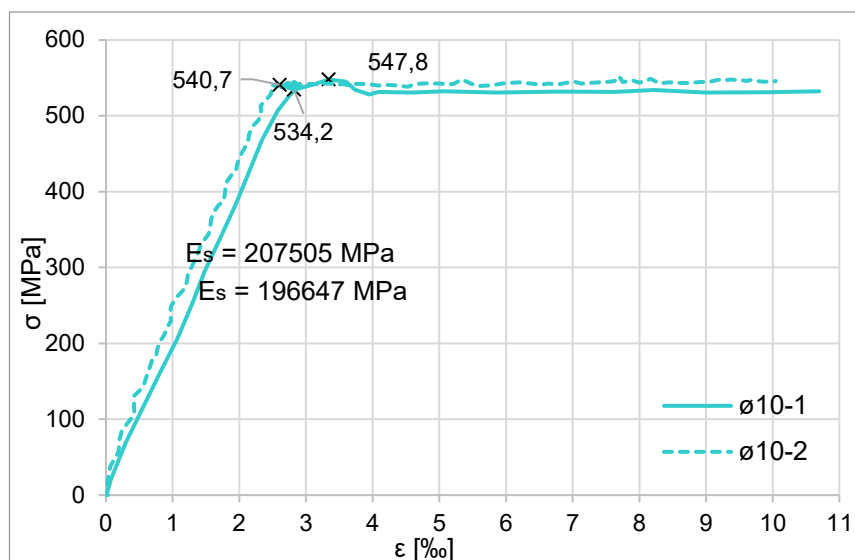
VEDLEGG H: PRØVING AV ARMERINGSSTÅL

Armeringen ble testet ved SINTEF i henhold til EN ISO 6892-1 den 23/03 2023. Det ble testet to prøver av hver diameter, Ø10, Ø16 og Ø20 mm. Prøvene hadde en lengde på 820 mm grep til grep. Prøvene ble kjørt deformasjonsstyrt med en lasthastighet på 12 mm/min opp til flyting og 96 mm/min etter flyting. En Instron 500 kN hydraulisk presse ble benyttet til testene. Tøyningene er bestemt med bruk av Digital Image Correlation (DIC) og ecorr programvaren ved NTNU. Tøyningene er tatt ut på midten over en lengde på ca. halvparten av prøvelengden.

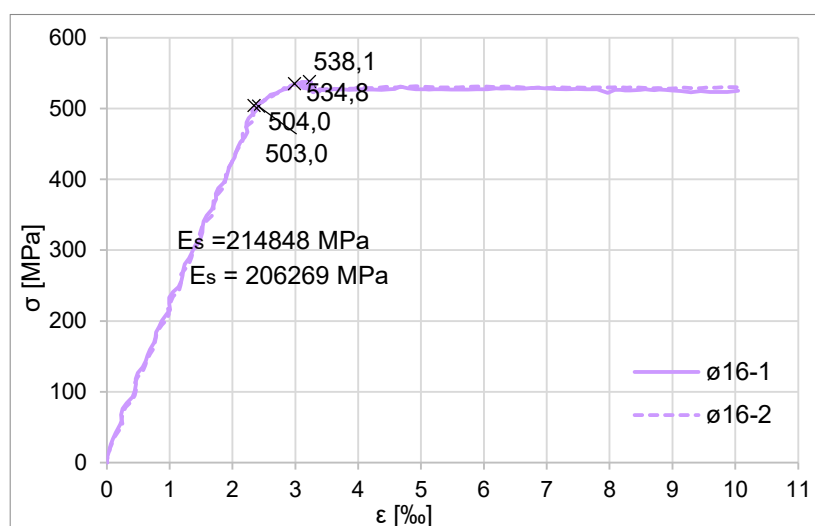
Resultater fra prøving av armeringsstål er vist i tabell H-1, mens figur H-1, H-2 og H-3, viser spennings-tøyningskurvene til prøvene med henholdsvis diameter 10, 16 og 20 mm. Figur H-4 sammenstiller en prøve av hver dimensjon. Tabellen angir resultatene til hver prøve og gjennomsnittet av prøvene med lik diameter. Flytspenning, f_y , er lik maks last på kurvene og flytetøyning er lik tøyning ved denne spenningen. E-modulen er beregnet i det lineære området til kurvene. Den høyeste spenningen i det lineære området er vist i figurene.

Tabell H-1: Resultater prøving av armeringsstål

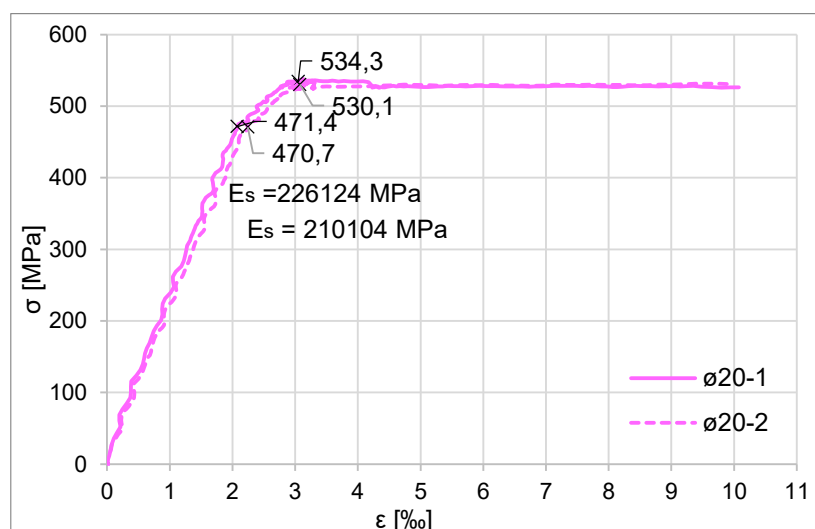
Prøve	f_y [MPa]	ϵ_y [‰]	E_s [MPa]
Ø10-1	547,8	2,61	196647
Ø10-2	540,7	3,34	196647
Ø10 (g-snitt)	544,3	2,98	207505
Ø16-1	534,3	2,99	206269
Ø16-2	538,1	3,22	214848
Ø16 (g-snitt)	536,2	3,11	210559
Ø20-1	534,3	3,07	226124
Ø20-2	530,1	3,05	210104
Ø20 (g-snitt)	532,2	3,06	218114



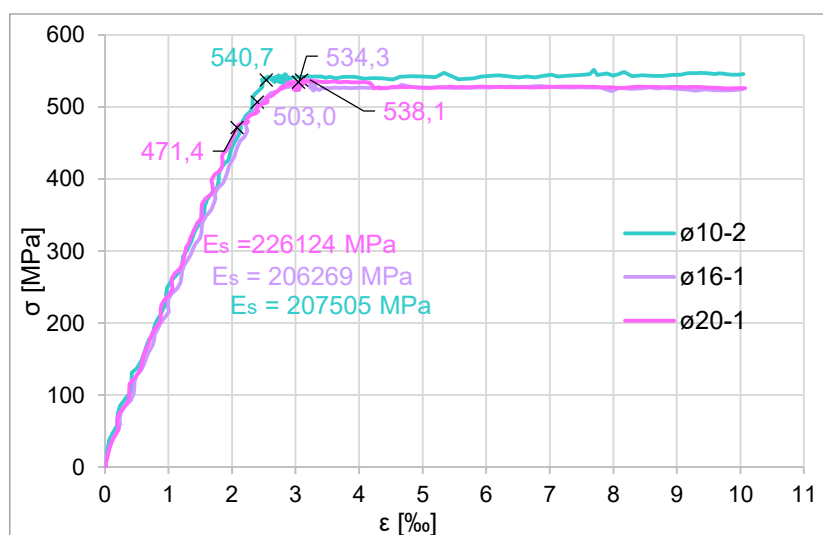
Figur H-1: Spennings-tøyningskurve Ø10 mm stenger



Figur H-22: Spennings-tøyningskurve Ø16 mm stenger



Figur H-33: Spennings-tøyningskurve Ø20 mm stenger



Figur H-44: En Spennings-tøyningskurve av hver dimensjon



Statens vegvesen
Pb. 1010 Nordre Ål
2605 Lillehammer

Tlf: (+47) 22 07 30 00

firmapost@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Tryggere, enklere og grønnere reisehverdag