



Dansk Betondag
September 2024

**Femern forbindelsen
er godt i gang.**

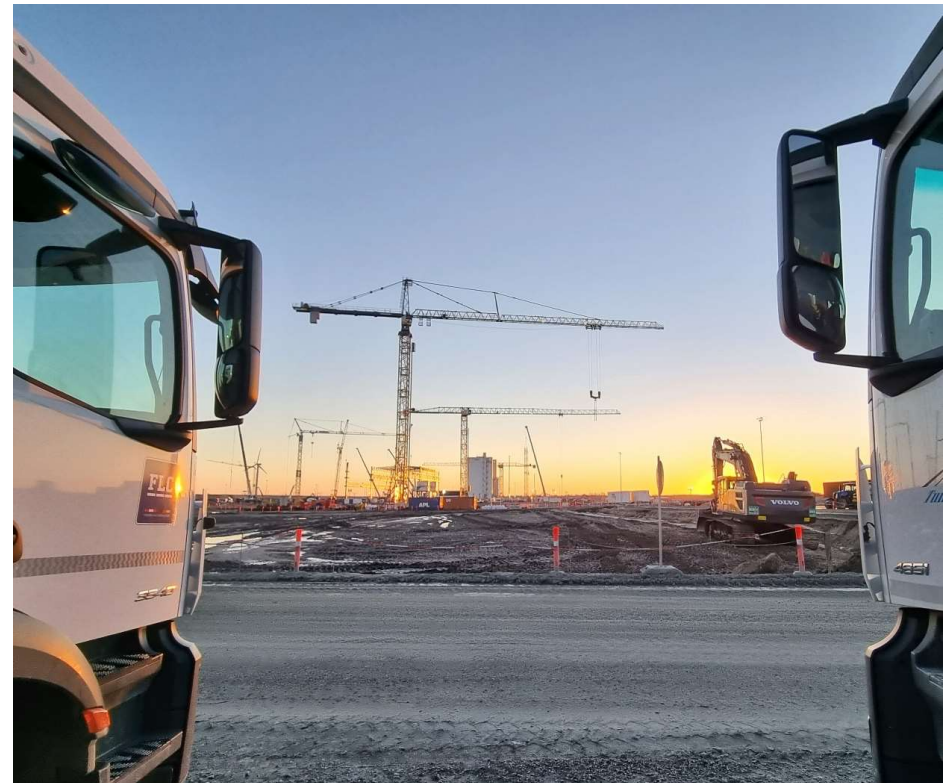
Ingrid Ahrenkilde
Concrete Mix Development Manager, FLC
Senior Project Manager, PAA



Agenda



- Femern forbindelsen – Facts
- Portaler og tunnel (beton)design
- Kravspecifikationer og betonrecepter - grundlag og udvikling.
- Eksempler - Beton resultater
- Produktion af tunnelementerne
- Indtryk fra siden og tunnelement fabrikken
- Bæredygtighed
- Databehandling og fremtiden



Kilde FLC

Femern forbindelsen – Verdens længste sænketunnel



- Femern forbindelsen er et af Europas mest omfattende byggeprojekter nogensinde. Femern tunnelen er en 18 kilometer lang sænketunnel, der vil forbinde Rødbyhavn på Lolland i Danmark med øen Fehmarn i Tyskland.
- Udover selve sænketunnelen består Femern forbindelsen af landanlæg på både dansk og tysk side. Jernbanen på begge sider af Femern bælt opgraderes til to elektrificerede spor og forbedres til hastigheder på op til 200 km/t. Når tunnelen er færdig, vil det være muligt at rejse mellem København og Hamborg med tog på mindre end tre timer.
- Forbindelsen er brugerfinansieret efter samme model som Storebælt og Øresund.



Femern forbindelse – Facts (1/2)



Kilde FLC

- Arbejdshavnen er 500.000 m² og med en sejldybde på 10,3 meter. Havnen vil modtage op til 80.000 tons sand, sten, cement og stål om ugen under byggefasen. Tunnelfabrikkens område, er ca. 1 mio. kvadratmeter. Det samlede areal for byggepladsen svarer til ca. 300 fodboldbaner eller Dragør by eller 2 x Snekkersten.
- Under byggeriet vil der blive udgravet ca. 19 millioner m³ sand og jord fra havbunden.
- Opfyldning af materiale fra havbunden giver 300 hektar ny natur og rekreative områder svarende til ca. 450 fodboldbaner.
- Ca. 2,2 millioner tons granit er blevet brugt til at etablere nye moler og bølgebrydere til opfyldningen.

Femern forbindelse – Facts (2/2)

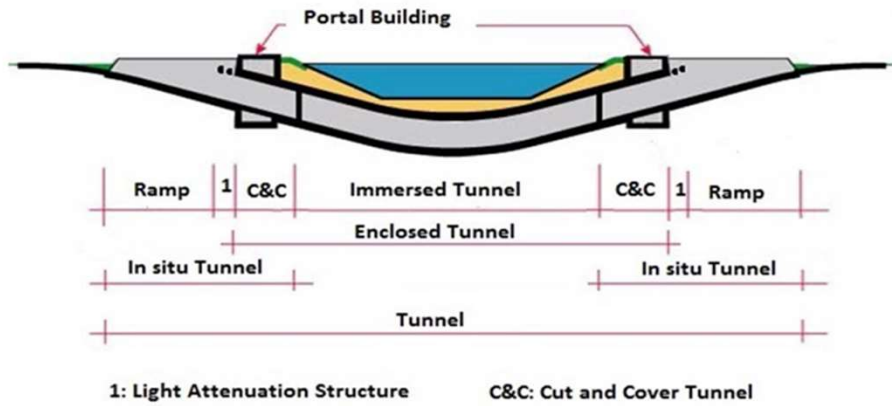


Kilde Femern A/S

- Byggeriet af Femern tunnelen kræver 360.000 tons armeringsjern og 3,2 millioner m³ beton. Til betonstøbning alene kræves 2 millioner ton sand.
- Tunnelen har en tosporet motorvej i hver retning og to elektrificerede jernbanespor.
- Tunnelen består af 79 enkelt elementer og 10 mindre specialelementer med en kælderetage til brug for udstyr til tunnelens drift og vedligeholdelse.
- Et standardelement vejer 73.000 tons og er 217 meter langt, 42 meter bredt og 10 meter højt.
- Tunnelens byggebudget er 52,6 milliarder DKK (anno 2015) - inklusive en reserve på 7 milliarder kroner.

Portaler – design

Portal-delene
Lolland



Portal-delene
Puttgarden



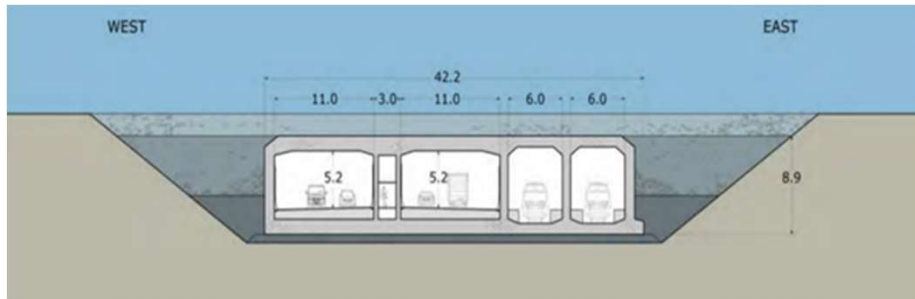
Kilde FLC



Kilde FLC

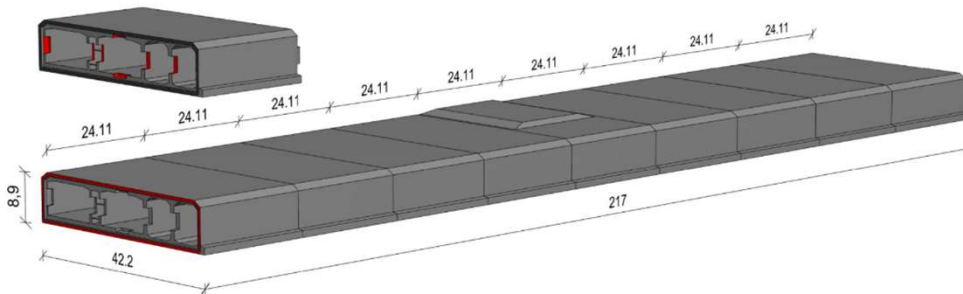


Tunnel - design



Standardelement - 79 stk.

- 217 m lang
- 73.000 tons
- Hver tunnelement består af 9 delsegementer
 - 42 x 24 x 9 m
 - ca. 3.200 m³ Beton



Specialelement - 10 stk.

- 38 m lang
- 23.000 tons
 - 45 x 38 x 13 m
 - Total på ca. 8.000 m³ beton

Den mest betydningsfulde innovation er anvendelsen af specialelementer, som er brede og har en underkælder til tekniske installationer. Dette muliggør rutinemæssig vedligeholdelse af tunnelen uden at påvirke brugerne overheadet



Udgangspunktet - for mange år siden



MAGASINET

BETON

16.11.2009

Temaer v Nyt fra... Nyheder Tilmeld nyhedsbrev

16.11.09 • NYHEDER

FOKUS PÅ FEJLFRI UDFØRELSE SKAL SIKRE FEMERN BÆLT- FORBINDELSENS LEVETID

Femern A/S er i fuld gang med at udarbejde kravene til beton for den kommende faste forbindelse. De 120 års levetid skal i høj grad opnås gennem færre udførelsesfejl og minimering af defekter.

Hverken linjeføring eller den konkrete udformning af den faste forbindelse over Femern Bælt er kendt endnu. Men alligevel står én ting så urokeligt fast som de kommende konstruktioner: Der bliver brug for masser af beton.

Derfor har Femern A/S siden april 2009 været i gang med at udarbejde kravene til betonen for den kommende forbindelse, fortalte projektchefen for tunnelen, Steen Lykke på Dansk Betondag i Helsingør.

Det sker i en betongruppe med både interne og eksterne eksperter, og med et par garvede betongutter som omdrejningspunkt Ulf Jönsson fra Femern A/S og Christian Munch-Petersen fra emcon. Begge har erfaringer fra Malmøs Citytunnel og Øresundsforbindelsen. Christian Munch-Petersen også fra Storebælt.

09:40 - 10:10 Sidste nyt fra Femern
v/Christian Munch-Petersen, Emcon

Dansk Betondag 2011

Femernprojektet er et meget stort betonprojekt. Til en 18 km lang sænketunnel med landanlæg går cirka 3 millioner m³ beton. Indlægget vil udover en projektstatus beskrive Femerns betonstrategi og kravprincipper. Femern har igangsat et stort forundersøgelingsprojekt, der involverer en eksponeringsplads i Rødby. De første resultater herfra vil blive fremlagt.



Beton til Femerntunnel

Eksponeringsplads

Christian Munch-Petersen, 1. november 2022 hos IDA



Beton strategi

- 120 års levetid med brug af velkendt teknologi
- = ikke start af korrosion eller større reparationer
- = velkendt teknologi med gode erfaringer
- Ikke konkurrence på kvalitet
- Bygherren definerer de krav, der sikrer levetiden



Femern
AGENCIER OG PARTNERE

FEMERN LINK CONTRACTORS

Kontraktgrundlag anno 2016



TPR Contract
Tunnel Portal and Ramps Contract
VOLUME 6
Design Requirements
May 2016

TPR Contract
Tunnel Portal and Ramps Contract
VOLUME 7
Materials Requirements
May 2016

TPR Contract
Tunnel Portal and Ramps Contract
VOLUME 8
Execution Requirements
May 2016

TUN Contract
Tunnel North Contract
VOLUME 6
Design Requirements
May 2016

TUN Contract
Tunnel North Contract
VOLUME 7
Materials Requirements
May 2016

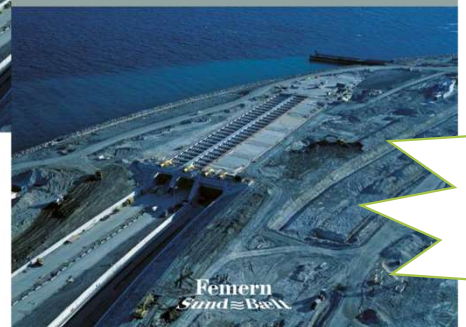
TUN Contract
Tunnel North Contract
VOLUME 8
Execution Requirements
May 2016

TUS Contract
Tunnel South Contract
VOLUME 6
Design Requirements
May 2016

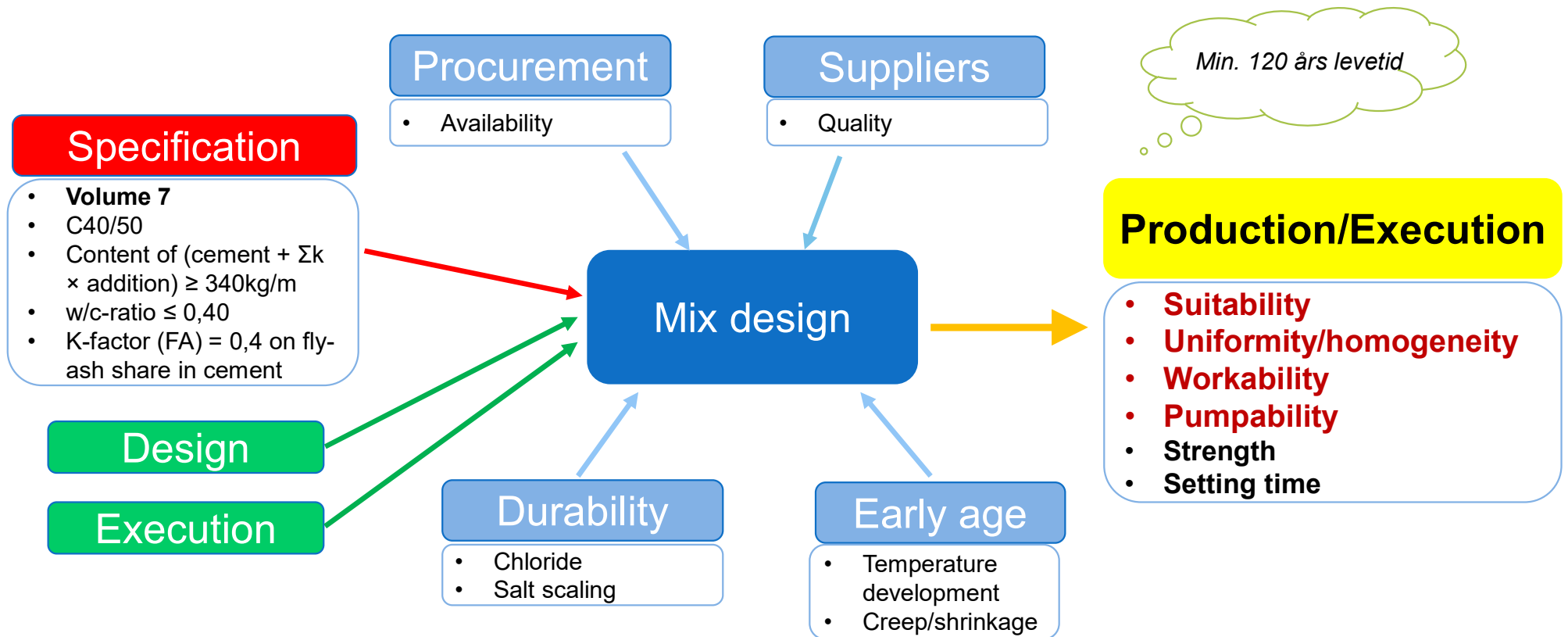
TUS Contract
Tunnel South Contract
VOLUME 7
Materials Requirements
May 2016

TUS Contract
Tunnel South Contract
VOLUME 8
Execution Requirements
May 2016

ca. 2.400 sider.



Beton recept grundlag



Miljøklasser/Eksponeringsklasser



Volume 7

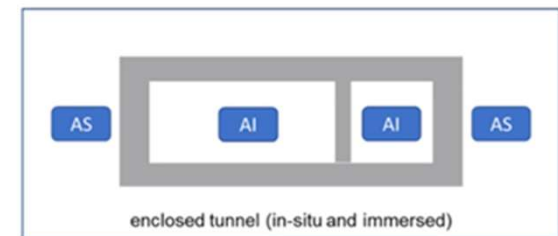
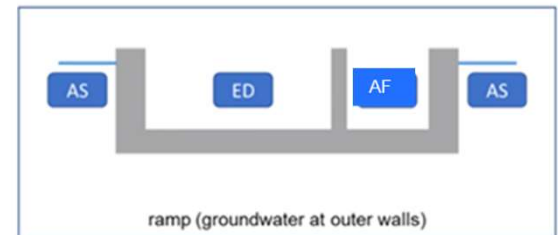
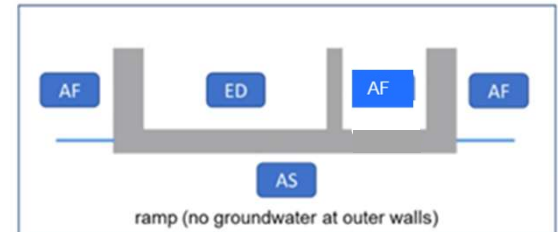
1.2.4.1 Exposure Classes related to Environmental Classes

1. The concept of Exposure classes in EN 206-1, section 4.1 is not used in these requirements. In these requirements 6 environmental classes are defined. The relevant exposure classes are combined into these 6 environmental classes.

Table 1-4: Environmental classes versus exposure classes from EN 206-1

Environmental class	AS	AI	EF	AF	ED	MB
X0						+
XC1	+					+
XC2						+
XC3						+
XC4		+	+	+	+	
XD1		+	+	+		
XD2						
XD3					+	
XS1		+		+	+	
XS2	+					
XS3			+			
XF1		+		+		
XF2				+	+	
XF3				+	+	
XF4			+		+	
XA1		+				+
XA2	+			+		
XA3			+		+	

AS	Aggressive – water Saturation with seawater or groundwater containing chlorides
AI	Aggressive – Inside
EF	Extra aggressive – possibly water saturation with seawater - frost possible
AF	Aggressive Frost – water saturation with seawater or ground water containing chlorides not possible – frost possible
ED	Extra aggressive De-icing – possibly water saturation and de-icing salt – frost possible
MB	Indoor (and blinding concrete)



Materialer og Beton recept udvikling



Lab - Testing

WP 4.1 - Aggregates

WP 4.2 - Binders

WP 4.3 Admixtures

WP 4.4 Concrete

WP 4.5 Deformation

WP 4.6 Fire

WP 4.7 Advanced Concrete

WP 4.8 Pumpability

Technical Qualification:

Admixture testing
Technical Qualification

Concrete testing
Technical Qualification aggregate > 5 mm

Design package – 28 d
Shrinkage / Thermal expansion

Design package
Indication of spalling behaviour

JV-Lab - Germany

JV-Lab - France

Pretest's & Full Scale test's

Udarbejdelse og gennemførelse af et omfattende testprogram for hver af de forskellige betonrecepter er blevet udført delvist for:

1. Udvalgelse af delmaterialer
2. Test og dokumentation af egenskaber (Pretest)
3. Test og dokumentation af egnethed (Full Scale test)



Kilde FLC



Kilde FLC



Kilde FLC

FERNMANNBILT FIXED LINK

Femern
Stord & Vass



RESULT REPORT
BASIS MIX DESIGN PRE-TESTING BMD13, C40/50
BINDER: CEM II/A-V,
ENVIRONMENTAL CLASS: AS, AI, MB, WP

FLC	FAS	IPC
06.07.2023	06.07.2023	06.07.2023
06.07.2023	06.07.2023	06.07.2023
06.07.2023	06.07.2023	06.07.2023
06.07.2023	06.07.2023	06.07.2023

Document prepared by: [Name]

Contract	Doc type	Rev	Location 1	Location 2	Activity	Issue	Req. No.	Rev.
TUX	REP	001	GE	GE	CCP	FLC	210000	1

06.07.2023

Test regime

Et omfattende test regime eller program er defineret.

- En segmentstøbning med ca. 3.200 m³ beton tager ca. 30 timer.
- Betonen pumpes op til 250 m fra de enkelte blandeanlæg via pumpelinjer til støbehallerne.
- Betonen testes ved blandeanlægget og efter pumpe for at følge og sikre kvaliteten.
- Laboratorierne er placeret ved siden af de 3 store blandeanlæg.
- Der er allerede trykket over 2000 terninger af den betonrecept, der udgør hovedrecepten til segmenterne.
- Foruden styrkes bestemmes friskbeton egenskaber løbende - hvert kvarter.
-Samt en række øvrige holdbarhedstests.

FEHMARNBELT FIXED LINK

Femern
Sund Æ Bælt



GENERAL PROCEDURE
TESTING REGIME ON FRESH CONCRETE

Int. Rev.	Issuance date	Revision description
1A	17-08-2020	
2A	04-09-2020	
2B	04-07-2024	

Document prepared by
Peter Vinet

Checked
Ingrid Arvola

Approved
Dimitrios Christofides

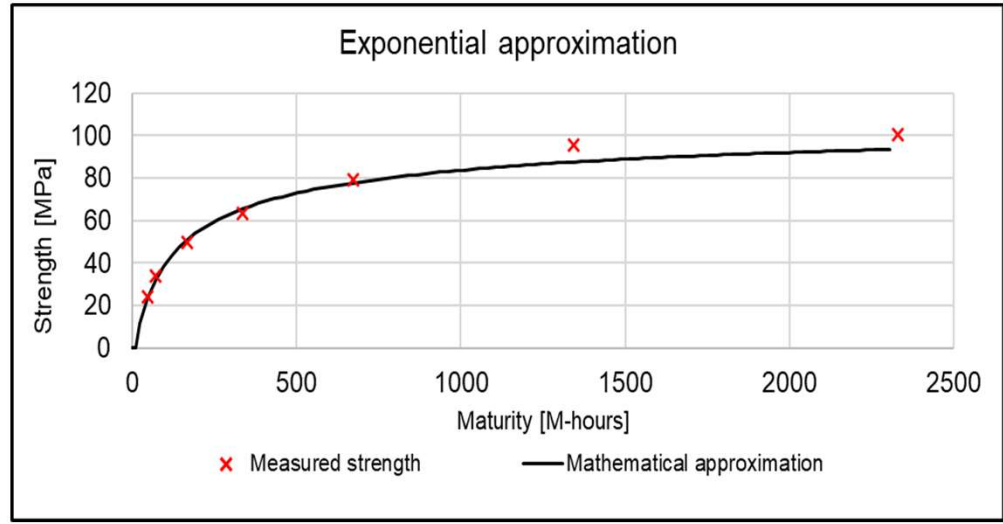
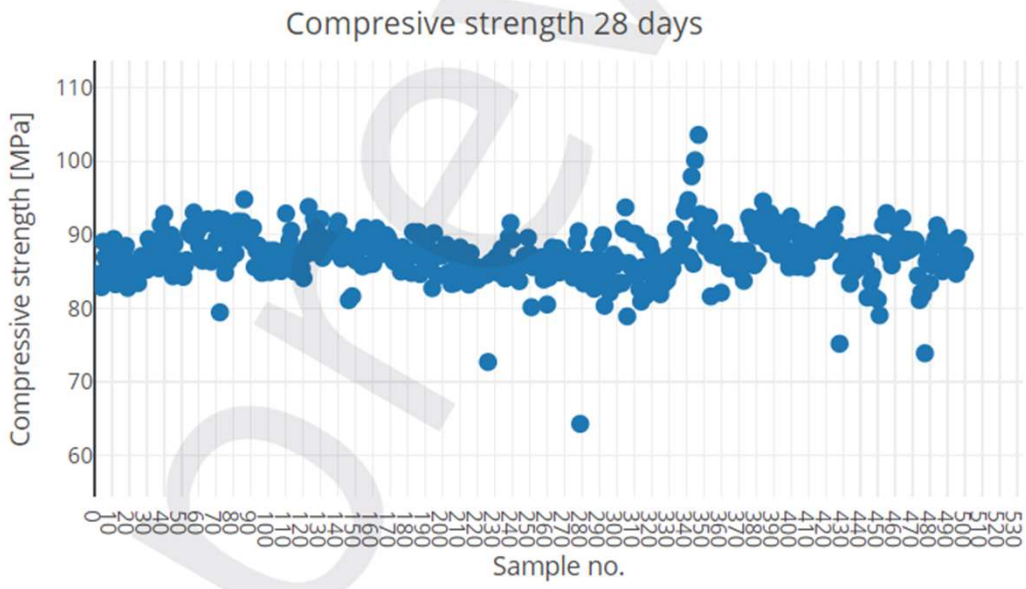
Contract	Doc type	BSI	Location 1	Location 2	Activity	Issue	Doc No	Rev.
TXX	GPR	GEN	GE	GE	QHE	FLC	000008	2

FL-003 rev 0

Styrke og styrkeudvikling



Kilde Betonhåndbogen



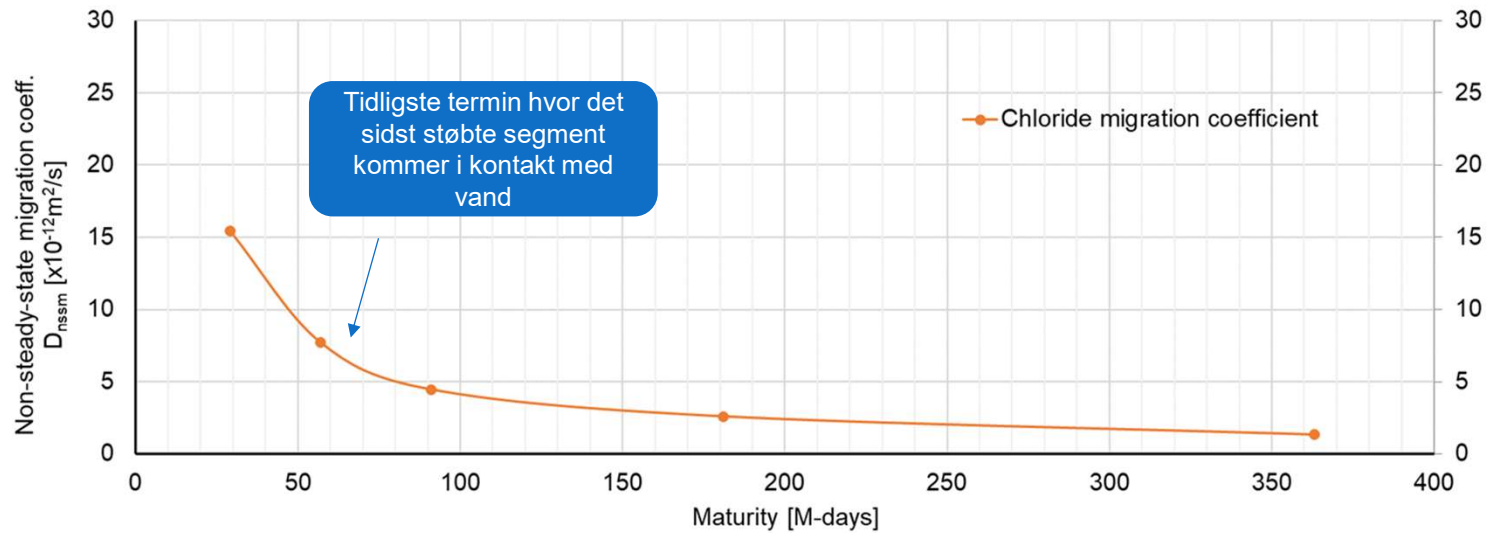
Chloride migration

Chloride migration is performed on drilled cores.

Chloride migration on drilled cores.

Block number 1		Chloride migration coefficient [x 10 ⁻¹² m ² /s]			Average [x 10 ⁻¹² m ² /s]
28 days	29 MT days	15.6	15.7	15.1	15.5
56 days	57 MT days	7.6	7.9	7.6	7.7
90 days	91 MT days	4.4	4.1	4.9	4.5
180 days	181 MT days	2.9	2.3	2.6	2.6
365 days	366 MT days	1.3	1.3	1.4	1.3
730 days	731 MT days	TBI	TBI	TBI	TBI

Tiden læger alle sår !
klorid påvirkningen
kommer ofte senere



I Østersøen er der typisk omkring 0,8 % salt.
I Kattegat omkring 2,0 % salt.
I Vesterhavet er der ca. 3,3 % salt

Produktion af tunnelementerne

Produktionen af segmenterne til standardelementerne foregår i tre produktionshaller A, B og C.

I hal A og B er der 2 produktionslinjer.
I hal C er der 1 produktionslinje.

Armeringen monteres og klargøres, hvorefter det skubbes ind i støbeformen og er klar til støbning.

Efter endt støbning, skubbes det videre til curing/hærde området og formen kan klargøres til næste segment indtil alle 9 segmenter er færdige og dermed et helt element.

Alle fem linjer er i fuld produktion, og de første fem tunnelementer er støbt og skubbet ud i øvre bassin



Kilde FLC



Kilde FLC



Kilde Femern A/S

Blandeanlæg og pumpelinjer

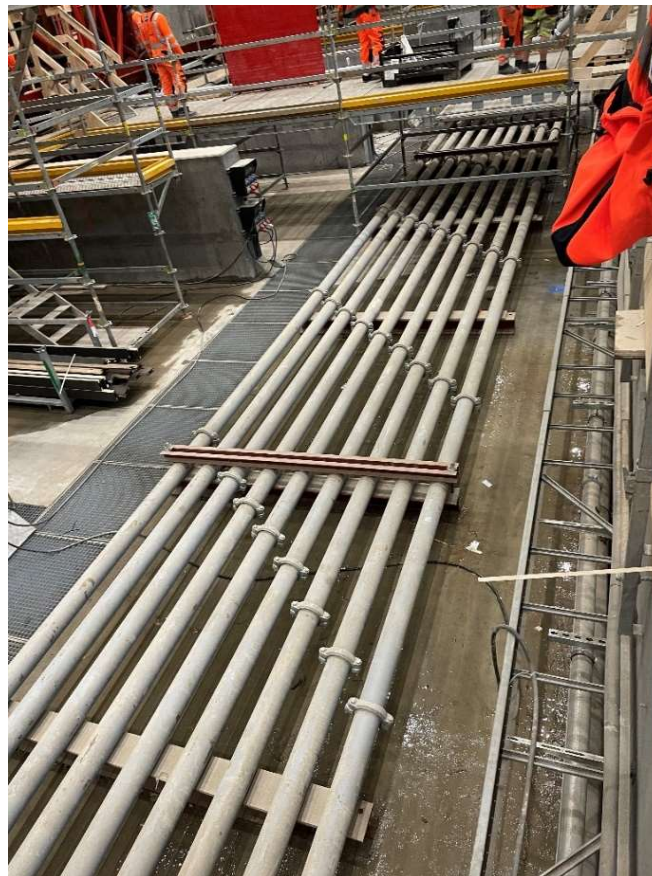
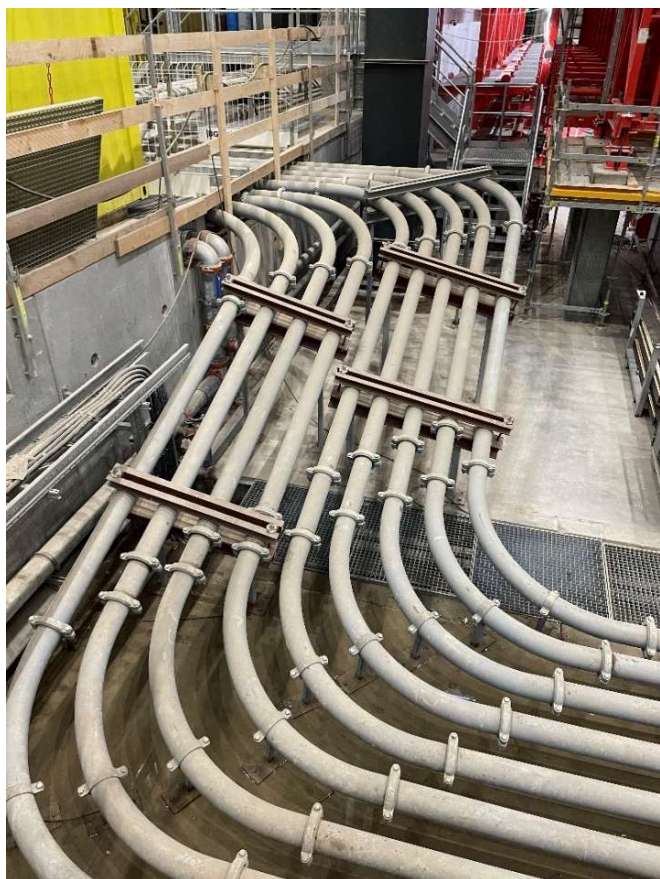


Kilde FLC



Kilde FLC

Blandeanlæg og pumpelinjer



Kilde FLC

Den længste
pumpelinje er på ca.
500 m

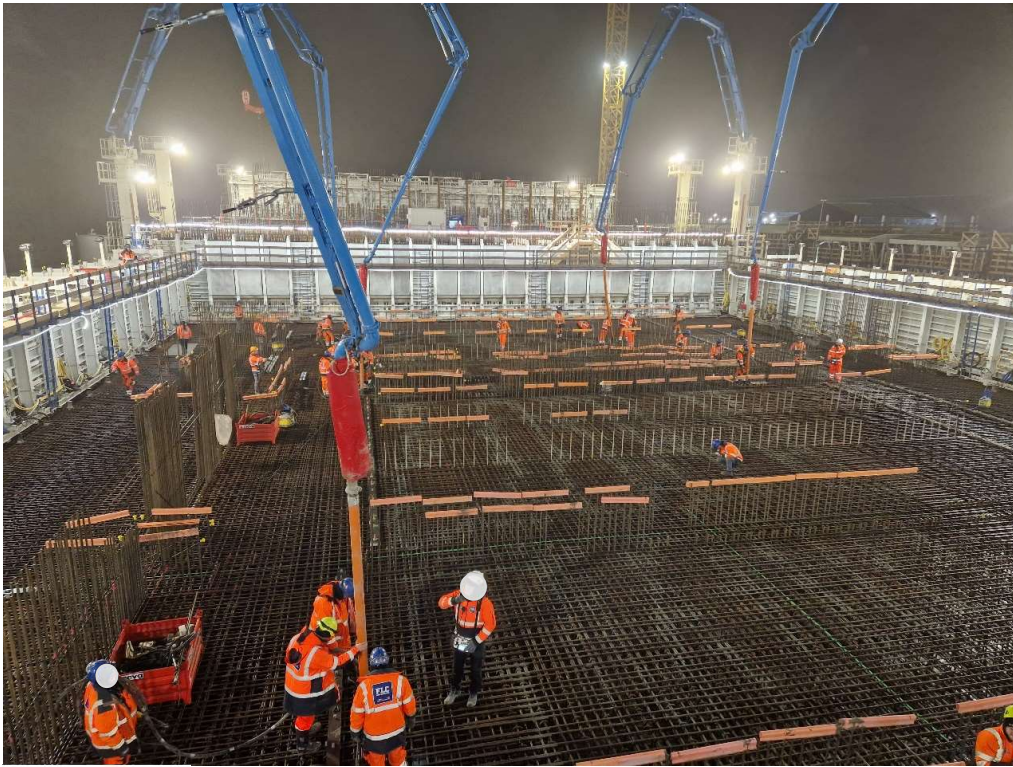


Kilde FLC



Kilde FLC

Casting of SPECIAL ELEMENT (BUND)



Kilde FLC



Kilde FLC



Kilde FLC

Bæredygtighed

120 års designlevetid er *bæredygtigt*.



- Betonen har langt den største indvirkning på CO₂-udledninger fra projektet, derfor er der blevet lagt særlig vægt på mulige reduktioner i CO₂-aftrykket af den beton, der skal bruges i projektet.
- Krav specifikationerne til betonen er dog fra før, der var rigtig fokus på og krav til bæredygtighed og CO₂ aftryk.
De restriktive kontraktmæssige specifikationer, der netop relaterer sig til en designlevetid på 120 år for tunnelelementerne og de permanente betonkonstruktioner har begrænset mulighederne for optimering.
- Et CO₂-reducerende beton initiativ, der er sat i gang, er ballastbetonen, der skal installeres i tunnelelementerne. Her erstattes konventionel beton med en Roller Compacted Concrete (RCC). RCC-tilgangen vil potentielt reducere CO₂-aftrykket af ballastbetonen med mere end 50%, da RCC har et betydeligt lavere cementindhold. Beregningen indeholder også brugen af forskalling og brændstof til transport af beton på stedet.

Bæredygtighed



- Bæredygtighed er mange andre ting end beton => andre vigtige fokus områder er blandt andet:
 - ✓ Transport af materialer (tilslag, cement etc.) Arbejdshavnen giver FLC mulighed for at anvende skibstransport, hvilket er den mindst CO2 belastende transportform.
 - ✓ Betonen pumpes primært direkte fra blanderen i stedet for transport med roterbil.
 - ✓ Installering af beton-vaskeanlæg. Muliggør genbrug af vand (både fra beton og vaskevand) og visse tilslagsmaterialer.

Hvilken læring skal vi tage med til de næste store infrastruktur projekter :

- Fokus på levetid, holdbarhed og bæredygtighed baseret på de seneste års erfaringer.
- Forbedring over tid: Betonens kvalitet forbedres med tiden. Overvej, hvornår kravene til styrke og kloridindhold skal opfyldes, f.eks. efter 56 dage eller senere.
- Alternative tilsætninger: Undersøge muligheder for anvendelse af alternative tilsætninger til betonen, der også er tilgængelige på lang sigt f.eks. kalksten, brændt ler/skifer etc.
- Ballast beton: Undersøge alternative materialer som erstatning for traditionel ballastbeton – (cement med høj klinker erstatning af e.g. kalcineret ler, kalkfiller, slagge eller cementfri beton – Geopolymer)
- Nye værktøjer: Brug af big data og machine learning kan forbedre kvaliteten, øge ensartetheden af frisk betons egenskaber, og reducere behovet for løbende kontrol, hvilket sparer tid og ressourcer.
- Vidensdeling: Effektiv anvendelse af viden og kompetencer, herunder at være åben for viden udenfor Danmark.

Lys forude



Kilde FLC



Kilde FLC

Tak for opmærksomheden