

UHPC i norsk brobygging

STEFFEN MONRAD



VEILEDER

Trond Olav Stupstad

Anette Heimdal

Ingrid Lande Larsen

Universitetet i Agder, 2020

Fakultet for teknologi og realfag

Institutt for ingeniørvitenskap

Obligatorisk egenerklæring

Den enkelte student er selv ansvarlig for å sette seg inn i hva som er lovlige hjelpemidler, retningslinjer for bruk av disse og regler om kildebruk. Erklæringen skal bevisstgjøre studentene på deres ansvar og hvilke konsekvenser fusk kan medføre. Manglende erklæring fritar ikke studentene fra sitt ansvar.

1.	Jeg/vi erklærer herved at min/vår besvarelse er mitt/vårt eget arbeid, og at jeg/vi ikke har brukt andre kilder eller har mottatt annen hjelp enn det som er nevnt i besvarelsen.	<input checked="" type="checkbox"/>
2.	Jeg/vi erklærer videre at denne besvarelsen: <ul style="list-style-type: none"> - ikke har vært brukt til annen eksamen ved annen avdeling/universitet/høgskole innenlands eller utenlands. - ikke refererer til andres arbeid uten at det er oppgitt. - ikke refererer til eget tidligere arbeid uten at det er oppgitt. - har alle referansene oppgitt i litteraturlisten. - ikke er en kopi, duplikat eller avskrift av andres arbeid eller besvarelse. 	<input checked="" type="checkbox"/>
3.	Jeg/vi er kjent med at brudd på ovennevnte er å betrakte som fusk og kan medføre annullering av eksamen og utestengelse fra universiteter og høgskoler i Norge, jf. Universitets- og høgskoleloven §§4-7 og 4-8 og Forskrift om eksamen §§ 31.	<input checked="" type="checkbox"/>
4.	Jeg/vi er kjent med at alle innleverte oppgaver kan bli plagiatkontrollert.	<input checked="" type="checkbox"/>
5.	Jeg/vi er kjent med at Universitetet i Agder vil behandle alle saker hvor det foreligger mistanke om fusk etter høgskolens retningslinjer for behandling av saker om fusk.	<input checked="" type="checkbox"/>
6.	Jeg/vi har satt oss inn i regler og retningslinjer i bruk av kilder og referanser på biblioteket sine nettsider.	<input checked="" type="checkbox"/>

Publiseringsavtale

Fullmakt til elektronisk publisering av oppgaven

Forfatter(ne) har opphavsrett til oppgaven. Det betyr blant annet enerett til å gjøre verket tilgjengelig for allmennheten (Åndsverkloven. §2).

Alle oppgaver som fyller kriteriene vil bli registrert og publisert i Brage Aura og på UiA sine nettsider med forfatter(ne)s godkjenning.

Oppgaver som er unntatt offentlighet eller taushetsbelagt/konfidensiell vil ikke bli publisert.

Jeg/vi gir herved Universitetet i Agder en vederlagsfri rett til å gjøre oppgaven tilgjengelig for elektronisk publisering:

JA NEI

Er oppgaven båndlagt (konfidensiell)?
(Båndleggingsavtale må fylles ut)

JA NEI

- Hvis ja:

Kan oppgaven publiseres når båndleggingsperioden er over?

JA NEI

Er oppgaven unntatt offentlighet?

JA NEI

(inneholder taushetsbelagt informasjon. Jfr. Offl. §13/Fvl. §13)

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet ved institutt for ingeniørvitenskap ved Universitet i Agder våren 2020. Oppgaven er gjennomført i perioden 06.01.2020 til 08.06.2020.

Målet med oppgaven er å avdekke hvilke materialer og egenskaper som inngår i UHPC, den norske bransjens mening om bruk av materialet i brokonstruksjoner, og hvordan materialet kan benyttes.

Jeg ønsker å takke veiledere på UiA og Kruse Smith for deres bidrag til oppgavens retning, mål og struktur. Veilederes engasjement og rådgivning bidro til viktige løsninger og målretting for oppgaven.

Summary

Ultra-high-performance concrete (UHPC) is a cementitious-based material combined with materials like fine sand or fine aggregation with maximum 8 mm in particle-size, microsilica, HRWR (high range water reducers), fiber-reinforcement and water. Compressive strength in UHPC ranges from 140 to 200 MPa, with a tensile strength above 5 MPa.

UHPC has been reported as a bridge-construction material as connections between prefabricated concrete-elements, rehabilitation, layer, protection panels and girders. UHPC provides a solid solution for connections that supports and transfers forces both axial and shear. Since UHPC has a high durability, it also prevents external intrusion from harming the reinforcement. UHPC also reach great bond with concrete, which also makes it an excellent material for rehabilitation on existing bridge constructions, and as layer above girders, with addition to the other advantages. As for girder-system, or beams, applying UHPC makes it possible to construct bridges with longer spans, reduced cross-sections, less weight and with less reinforcement. Connection between prefabricated elements is the most common use with UHPC as an application for bridge constructions. At least 280 bridges are built with this solution world-wide.

This report concerns materials and properties within UHPC, the Norwegian bridge-industries opinion about UHPC in bridge construction, and how UHPC may be applied as a bridge-construction material. Research regarding material properties and choice of materials were revealed to answer the following research question; What is needed to use UHPC in Norwegian bridge-construction. Reports concerning earlier experience with UHPC in bridge-construction were also used to understand and gain information about how UHPC is used. Interviews were applied to reveal the opinion of the Norwegian bridge-industries. As part of this, and as an interest of this report, FHWA (Federal Highway Administration) and Dura Technology were contacted and asked why UHPC were used and how it is applied as a bridge-material.

The Norwegian bridge-industry regards UHPC as a possible construction-material for Norwegian bridges. UHPC as a connection-material and rehabilitation seems to be the most favorable application by the Norwegian industry. UHPC-bridge-elements, layer and protection panels are less attractive due to regulations and lack of knowledge. However, all the applications are considered by the industry to have both potentials and disadvantages. As bridge-elements, UHPC may provide lighter constructions with less materials, and still provide longer spans, longer lifetime and less maintenance. As layer, UHPC may provide a more solid bridge-deck with no demand for rehabilitation work and with minimal need of maintenance. Still, this need is not yet demanded by the industry, and it is not known that bridge-decks are commonly in need of rehabilitation works in Norway, at least not for new bridge-constructions. As for rehabilitation works, UHPC may be more favorable towards rehabilitating older concrete-bridge-decks and other elements.

UHPC may be applied as a bridge-construction-material if the documentation supports the advantages that UHPC may provide through its different applications. Regulations and standards are needed to support the industry in applying materials such as UHPC. Even if this material is showing promising results due to its advantages in Norway, as in other countries, regulations makes it difficult to apply UHPC in Norwegian bridge-constructions. Since the industry is demanding the government to engage in research and development in knowledge, it is believed that to create regulations concerning a new material, a demand needs to be in place by the industry.

Innholdsfortegnelse

Obligatorisk egenerklæring.....	2
Publiseringsavtale	3
Forord.....	4
Summary	5
Figurliste.....	8
Tabelliste	9
1 Innledning	10
2 Samfunnsperspektiv.....	11
3 Teori.....	12
3.1 Generelt	12
3.2 Materialinnhold	14
3.2.1 Sementholdige materialer	14
3.2.2 Tilslag	14
3.2.3 Tilsetningsstoffer.....	15
3.3 Materialeegenskaper	16
3.4 Brokonstruksjoner og byggemetoder	17
4 Forskerspørsmål.....	18
4.1 Avgrensninger	18
5 Case.....	19
6 Metode.....	20
6.1 Litteraturstudium.....	21
6.1.1 Søkemetodikk.....	21
6.2 Intervju.....	22
6.2.1 Intervjugjennomføring	23
7 Resultat	24
7.1 Materialer, egenskaper og sammensetninger	24
7.1.1 Materialsammensetninger gitt av FHWA.....	24
7.1.2 Materialsammensetninger- og egenskaper avdekket i artikler	26
7.2 Intervju av betong- og brobransjen	30
7.2.1 utfordringer med dagens betongbrokonstruksjoner	32
7.2.2 Bransjens meninger om UHPC	33
7.2.3 Bransjens meninger om hvordan UHPC kan benyttes.....	35
7.3 Hvordan UHPC kan benyttes.....	37
7.3.1 Hvorfor UHPC benyttes	37
7.3.2 Tidligere bruk av UHPC i Nord-Amerika	37

8	Diskusjon	45
8.1	UHPC-materialer og materialeegenskaper	45
8.1.1	Materialer	45
8.1.2	Materialsammensetninger og egenskaper	46
8.2	Bransjens mening om UHPC	49
8.3	Hvordan UHPC kan benyttes.....	53
8.3.1	Tidligere bruk av UHPC i Nord-Amerika.....	56
8.4	Eksterne innvirkninger på oppgaven	58
9	Konklusjon.....	59
10	Anbefalinger.....	61
11	Referanser.....	62
12	Vedlegg	64

Figurliste

Figur 6.1. Beskrivelse av metoder [13].	20
Figur 7.1. Bøystyrken til de tre UHPC-reseptene i henhold til volum fiberinnhold [7, s. 35].	28
Figur 7.2. Trykkfastheten til de tre UHPC-reseptene i henhold til volum fiberinnhold [7, s. 35].	29
Figur 7.3. Respondentenes rolle i industrien [13].	30
Figur 7.4. Respondentenes erfaring med broer eller betong [13].	31
Figur 7.5. Tverrsnitt av koblingene mellom elementene for konstruksjonen i Delaware [16, s. 3].	38
Figur 7.6. UHPC som koblingsmateriale i endene av Delaware broen [16, s. 3].	39
Figur 7.7. Den faktiske brokonstruksjonen i Delaware i Nord-Amerika [16, s. 4].	39
Figur 7.8. UHPC-kobling mellom prefabrikkerte dekke-bjelke-elementer [15, s. 4].	41
Figur 7.9. UHPC-kobling mellom prefabrikkerte brodekkeelementer og støttebjelker [15, s. 4].	41
Figur 7.10. UHPC-kobling mellom større konstruksjonselementer [15, s. 4].	41
Figur 7.11. UHPC kobling mellom prefabrikkerte boksbjelker [15, s. 5].	42
Figur 7.12. UHPC-kobling mellom eksisterende brospøyle og ny tverrbærer/mellomstøtte [15, s. 5].	42
Figur 7.13. Rehabilitering med UHPC som et belegg over bæreelementene [15, s. 7].	43
Figur 7.14. Rehabilitering av stålbjelker med UHPC [15, s. 7].	43
Figur 7.15. Bruk av UHPC på eksisterende søyler [15, s. 8].	44
Figur 7.16. Sammenligning av tverrsnittet til en ordinær betongbjelke og UHPC-bjelke [15, s. 9].	44

Tabelliste

Tabell 3.1. Områder for materialegenskaper til UHPC [6, s. 26].....	16
Tabell 7.1. Sammensetning av UHPC-blandingen DUCTAL gitt i FHWA rapport [6, s. 5].....	24
Tabell 7.2. UHPC-sammensetning av Teichmann og Schmidt [6, s. 7].....	25
Tabell 7.3. UHPC-klassen Cor-Tuf [6, s. 7].....	25
Tabell 7.4. UHPC-klassen CEMTEC _{multiscale} [6, s. 8].....	25
Tabell 7.5. Trykkfasthet og E-modul i henhold til lengde og mengde fiberarmering [5, s. 432].	26
Tabell 7.6. Strekkfasthet over gitt antall døgn i henhold til lengde og mengde stålfiber [5, s. 433]....	27
Tabell 7.7. Materialer benyttet i UHPC-blandingen rapportert av R. Yu et al. [7, s. 30].	27
Tabell 7.8. Tre UHPC-resepter gitt i rapporten av R. Yu et al [7, s. 31].....	28
Tabell 7.9. Bøyestrekfasthet og trykkfasthet etter 28 dagers herdetid [7, s. 35].....	29

1 Innledning

UHPC (Ultra High Performance Concrete) er et sementbasert materiale med tilhørende komponenter som fint tilslag, vann, sementholdige materialer, tilsetningsstoffer og fiber. Blant disse komponentene er UHPC ofte sammensatt av materialer som Portlandsement, mikrosilika, fin sand (veldig fine sandkorn), superplastiserende tilsetningsstoff og stålfiber. Andre typer materialer som kvarts, kvartssand, silika-pulver og kalkstein kan også benyttes for å redusere sement- eller mikrosilika-mengder, eller som erstatning til noe av tilslaget. Vannsementforholdet er som oftest veldig lavt, men kan måtte endres avhengig av materialinnhold.

UHPC er blitt benyttet og rapportert i over 300 brokonstruksjoner over hele verden som et koblingsmateriale, rehabiliteringsmateriale, bæresystem, rekkverk og belegg. UHPC har utmerket seg i andre land å være et godt materiale for å koble sammen andre prefabrikkerte broelementer. Andre bruksområder som belegg og rehabilitering har også vært en suksess med UHPC, men i mindre grad sammenliknet med kobling. Bæresystem er blitt benyttet i mindre grad grunnet høye kostnader, og rekkverk er også blitt benyttet relativt lite. Egenskapene som gjør at UHPC er blitt et ettertraktet materiale i de nevnte bruksområdene er at det har god heft mot betong, materialet har også høy trykkfasthet, bøyestyrke og strekkfasthet, og det er veldig motstandsdyktig mot ytre inntrengninger. Levetiden til materialet er rapportert å være over 100 år med redusert behov for vedlikeholds- og reparasjonsarbeider.

I samarbeid med UiA og Kruse Smith vil denne oppgaven vurdere hva bransjen mener om materialet, hvordan materialet kan benyttes, og hvilke materialer og egenskaper som inkluderes i UHPC. Målet med oppgaven er å avdekke om UHPC har fremtidig potensiale som et konstruksjonsmateriale for brobygging i Norge.

Forskerspørsmålet er satt i samarbeid med UiA og Kruse Smith, og er blitt stilt som følge:

Hva skal til for at UHPC benyttes i norsk brobygging?

2 Samfunnsperspektiv

Innen 2030 er det satt som mål å redusere klimagassutslipp fra bygging, drift og vedlikehold av samferdselsinfrastrukturen i Norge. Betong og armering utgjør den største delen av disse klimautslippene [1, s. 6]. Ved å redusere de store bygningsmaterialene som betong og armering, kan det oppnås store besparelser av klimagasser [1, s. 3]. Konstruksjoner av armert betong, som brokonstruksjoner, må også ofte vedlikeholdes som følge av aldring og nedgradering grunnet ytre forhold og store mekaniske laster [2, s. 1]. Bransjen mener også at utfordringer med dagens brokonstruksjoner er at de har stor egenvekt, dårlig klimaregnskap og oppnåelse av god bestandighet. Brokonstruksjoner som blir bygd i dag kan anses å inneholde store mengder betong og armering, og må vedlikeholdes mer enn planlagt. UHPC kan bidra til en bærekraftig løsning ved reduksjon i mengder og vedlikehold til norske brokonstruksjoner.

UHPC som et konstruksjonsmateriale reduserer behovet for vedlikeholds- og reparasjonsarbeider og materialmengder som følge av god bestandighet og materialegenskaper [3, s. 31]. Den gode bestandigheten gjør at materialet kan ha en levetid på over 100 år [3, s. 14]. UHPC er derimot dyrt og krever mye energi å produsere [3, s. 15]. Men det er uansett muligheter for økonomiske- og miljøgevinst ved bruk av materialet grunnet lenger levetid, bedre bestandighet og mindre materialbruk.

Optimaliserte brokonstruksjoner med tanke på miljø, økonomi og bestandighet, virker å være et fremtidig mål for en mer bærekraftig løsning for norske brokonstruksjoner. UHPC kan være et aktuelt materiale for å bidra til bærekraftige løsninger som kan redusere materialbehov, og opprettholde bestandigheten med et redusert behov for vedlikehold.

Brokonstruksjoner med UHPC har også oppnådd lavere vekt og lenger spenn [3, s. 16 & 32]. Dette kan gi virkning med slankere og færre antall søyler på brokonstruksjoner, noe som kan og mindre materialbehov.

UHPC kan gi muligheter til å bygge bærekraftige og optimaliserte brokonstruksjoner i Norge som en del av å redusere klimagassutslipp fra bygging til drift og vedlikehold. I tillegg kan det også være av økonomisk interesse å benytte UHPC til denne løsningen. Redusert behov for materialer og vedlikehold er hovedfaktorene for denne muligheten.

3 Teori

Teorien som blir presentert her omhandler UHPC i følgende områder: generelt, materialinnhold, materialegenskaper og bakgrunnsteori om brokonstruksjoner og byggemetoder. I teorikapittelet vil også noe resultat, diskusjon og konklusjon fra forprosjektet «UHPC i brobygging» bli presentert.

Store deler av bakgrunnsteorien er hentet fra forprosjektet «UHPC i brobygging» og FHWA sin rapport «Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community». Flere andre artikler som henviser til materialbruk, materialsammensetninger og materialegenskaper er også blitt benyttet som en del av bakgrunnsteorien. FHWA er for øvrig USA sitt departement for transport og står for vedlikehold og bevaring av motorveier, broer og tunneller i USA, samt tilbyr teknisk assistanse for å blant annet fremme innovasjon [4].

3.1 Generelt

UHPC (Ultra High Performance concrete) er et sementbasert materiale med en trykkfasthet større enn 150 MPa og strekkfasthet større enn 7 MPa [5, s. 429]. UHPC består oftest av Portlandsement, fin sand, silica støv, superplastiserende tilsetningsstoff, stålfiber og vann. Kjemiske tilsetningsstoffer og små tilslag blir også til tider benyttet [6, s. 5].

Avdekket gjennom testing og retningslinjer, varierer strekkfastheten til fiberarmert UHPC mellom 5 og 15 MPa [3, s. 12]. Materialet har et lavt vannbindemiddelforhold og store mengder sement sammenlignet med andre betongmaterialer [5, s. 429]. Normalt ligger vannbindemiddelforholdet på 0,16 eller lavere. Dette fører til reduksjon av både størrelsene til porene og antall porer, samt at de ikke er kontinuerlige, som gjør materialet motstandsdyktig mot ytre inntrengninger [3, s. 13]. I tillegg til å være motstandsdyktig mot ytre inntrengninger som karbonatisering og klorider, har den også god motstand mot fryse- og tineprosesser [3, s. 32].

I forprosjektet «UHPC i brobygging» ble det avdekket at motstandsdyktighet, besparelse av vekt og materialer, og lang levetid med redusert vedlikeholdsarbeid var viktige faktorer ved en økonomisk vurdering av UHPC [3, s. 31 & 32]. Som en del av materialbesparelser ved UHPC kan blant annet overdekningen reduseres fra 75 mm til 19 mm [3, s. 15]. I henhold til forskning har bruk av UHPC, som følge av dens gode mekaniske og fysiske egenskaper, vist seg å blant annet være en effektiv metode til å styrke armerte betongkonstruksjoner [2, s. 2]. Konstruksjoner av armert betong må ofte vedlikeholdes som følge av aldring og nedgradering oftest på grunn av ytre forhold og store mekaniske laster. Rehabilitering er som oftest nødvendig for å øke levetiden til konstruksjoner, samt for å redusere vedlikeholdskostnader [2, s. 1].

Fiberarmert UHPC er en kombinasjon av høystyrke betong og fiberarmering, der grovt tilslag er erstattet med fin sand [7, s. 29]. Nye innoverende betonger som UHPC inneholder som regel en stor mengde sement, mikrosilika og fiberarmering, med et lavt vannsementforhold som bidrar til materialets gode egenskaper [8]. Sementmengden i UHPC ligger normalt på 800 til 1000 kg/m³, noe som blant annet påvirker varmeutvikling i produktet og produksjonskostnader [9, s. 744]. Disse store mengdene bidrar til at UHPC sine egenskaper økes betraktelig. Trykkfastheten er som et eksempel mer enn syv ganger så høy enn tradisjonell betong, og strekkfastheten er tre ganger så stor [8]. Det kan det utføres identiske tester på UHPC som på ordinær betong for å fastsette trykkfastheten [6, s. 13].

UHPC sin høye styrke og homogenitet gjør at materialet er veldig sprøtt, men ved å tilsette fiberarmering økes duktiliteten i materialet [5, s. 430]. Materialet produserer mye varme, og tiltak som å pakke inn konstruksjonsdelen er viktig [3, s. 12 - 13]. Manglende retningslinjer og erfaring begrenser bruken av UHPC. Flere land holder derimot på å utvikle retningslinjer for UHPC. Land som Frankrike, Japan og Australia har tatt i bruk retningslinjer, mens land som Spania, Tyskland og Sveits holder på å utvikle retningslinjer [3, s. 36].

Høye kostnader, begrensninger av prosjekter som benytter materialet, manglende retningslinjer og manglende kunnskap hindrer bruken av UHPC. Med mindre industrien vurderer at det er en økonomisk gevinst med UHPC vil det heller ikke bli investert i utviklingen av materialet. Bygherrer som blir utfordret på et begrenset budsjett, begrenser også bruken av nye materialer, spesielt når det er usikkerhet rundt det nye materialet. Kostnader og manglende bruk av UHPC er også med på å hindre materialet i å nå frem i industrien. Livssyklus-kostnaden for en konstruksjon er derimot nødt til å vurderes for å kompensere for den store kostnaden til UHPC siden UHPC kan bidra til bedre bestandighet [8].

3.2 Materialinnhold

Materialene i UHPC inkluderer sementholdige komponenter, kvarts, kvartssand, superplastiserende tilsetningsstoffer og fiber. Sanden er det groveste materialet med en partikkelstørrelse på mellom 150 til 600 mikrometer. Kvarts har en partikkel størrelse distribusjon fra 0,1 til 100 mikrometer [9, s. 744].

Distribusjonen av porøsitet og porestørrelser kan forbedres blant annet ved å bruke superplastiserende tilsetningsstoffer [9, s. 742]. Superplastiserende tilsetningsstoffer kan også redusere vann/ment-rate behovet uten å påvirke støpeligheten. I tillegg blir porene redusert samt at styrken øker på UHPC-produktet [9, s. 743].

De vanlige sementholdige materialene kan blant annet være Portlandsement, mikrosilika, slagg, flyveaske og RHA (risaske) [9, s. 744 & 745]. Ved å kombinere sementholdige materialer som flyveaske og slagg, som erstatning for deler av sement- og mikrosilika-innholdet, kan materialkostnadene for UHPC reduseres uten å påvirke styrken [9, s. 741]. I henhold til Stengel og Scheibl, gitt i FHWA sin rapport «A State-of-the-Art Report for the Bridge Community», er det produksjonen av fiberarmering, sement og superplastiserende tilsetningsstoff som påvirker miljøkonsekvensene ved UHPC. Miljøpåvirkningen kan dermed reduseres ved å redusere mengde sement, stålfiber og superplastiserende tilsetningsstoff [6, s. 4]. Industrielle bi-produkter som mikrosilika, slagg og RHA (risaske) kan benyttes som delvis erstatning av sementen i UHPC for å redusere kostnader [7, s. 29].

3.2.1 Sementholdige materialer

Vanlige sementholdige materialer kan blant annet være Portlandsement, mikrosilika, slagg, risaske, flyveaske og kalkstein-pulver [9, s. 744]. Mikrosilika er et biprodukt av silisium-produksjon og er en viktig bestanddel for UHPC. Det er et fint stoff med en diameter på 2 mikrometer. Flere har anbefalt at av sementinnholdet i UHPC, bør 30 til 35 % bestå av mikrosilika. Mengde mikrosilika er dermed avhengig av vannsementforholdet der et lavere vannsementforhold gir et mindre behov for mikrosilika. Forskere rapporterer at et optimalt mikrosilika innhold på 30 til 35 % av sementen i UHPC gav en trykkfasthet på 200 MPa [9, s. 744].

Flyveaske er et biprodukt fra kullkraftverk og er vanligvis kombinert med slagg, mikrosilika eller stålsagg. Det er rapportert at UHPC med et høyt innhold av slagg og flyveaske gav en trykkfasthet over 200 MPa avhengig av herdemetode. Denne kombinasjonen kan også forbedre bøyestyrken til UHPC [9, s. 744].

Risaske dannes ved å brenne risskall, som er et avfallsprodukt fra landbruk. Når risasken er ferdig forbrent, under kontrollerte forhold, inneholder den opp til mellom 90 og 96 % silica og blir sett på som et veldig reaktivt pozzolan. Partikkelstørrelsen på risaske er mellom 5 og 10 mikrometer [9, s. 745]. Pozzolan er et silica-basert materiale som, ved nærvær av fuktighet, kjemisk reagerer med kalsiumhydroksid ved romtemperatur og danner et materiale med sementliknende egenskaper. Det finnes naturlige og kunstige pozzolaner [10, s. 50]. Eksempel på kunstige pozzolaner er flyveaske og mikrosilika [10, s. 4].

3.2.2 Tilslag

Tilslag er generelt et rimelig materiale til betong kostnadmessig, men raffinert kvartssand kan ha store kostnader. For å redusere kostnader for UHPC kan det benyttes materialer som resirkulert glass, naturlig sand og kunstige tilslag fremfor raffinert kvartssand som tilslag. Bruk av resirkulert

glass reduserer derimot bøyestyrken, trykkfastheten og bruddenergien med 15 %. Naturlig sand er rapportert å gi liknende mekaniske egenskaper og duktilitet som raffinert kvartssand [9, s. 746]. Det er også rapportert at å erstatte kvarts med naturlig tilslag, med maks partikkelstørrelse på 8 mm, ikke påvirker trykkfastheten selv med det samme vannsementforholdet [6, s. 6]. For kommersiell UHPC har FWHA (Federal Highway Administration) anbefalt en maks kornstørrelse på 0,8mm og et sand-til-vann-forhold på 1,4 [6, s. 5].

3.2.3 Tilsetningsstoffer

Det er det lave vannsementforhold som gjør at det er behov for superplastiserende tilsetningsstoffer [5, s. 429]. Valg av superplastiserende tilsetningsstoffer til UHPC kan påvirke flyteevnen til UHPC i fersk fase [9, s. 746 - 747]. Blant annet utgjorde tilsetningsstoffet acrylic polymer at vannsementforhold i en UHPC-blanding kunne reduseres. Sammenlignet med andre tilsetningsstoffer gav UHPC med acrylic polymer også en høyere trykkfasthet [6, s. 7]. Superplastiserende tilsetningsstoffer gjør det mulig å bearbeide fersk UHPC [5, s. 429]. Kjemiske tilsetningsstoffer som brukes i UHPC er allerede tilgjengelige i betongindustrien [11, s. 4].

3.3 Materialeegenskaper

I henhold til FHWA sin rapport «Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community» har de oppgitt, som vist i tabell 3.6, egenskapsområder for konstruksjoner av UHPC [6, s. 25 & 26].

Tabell 3.1. Områder for materialeegenskaper til UHPC [6, s. 26].

Egenskaper	Område
Trykkfasthet	140 til 200 MPa
Strekfasthet	6 til 10 MPa
E-modul	40 til 70 GPa

I henhold til tidligere forskning avdekket i prosjektet «UHPC i brobygging» kan de mekaniske egenskapene til UHPC variere avhengig av faktorer som herdemetoder og temperatur [3, s. 30]. I henhold til Shi et al. påvirkes de mekaniske egenskapene til UHPC av type råmaterialer, forberedelsesteknikker og herdemetoder [9, s. 741].

Shi et al. oppsummerte at sementholdige materialer som flyveaske og slagg kan redusere kostnadene til UHPC og samtidig opprettholde en trykkfasthet på 150 til 200 MPa [9, s. 749]. Yu et al. beskriver at bruk av RHA (risaske) som erstatning til silica gjør at UHPC fortsatt oppnår en trykkfasthet over 150 MPa [7, s. 29].

Ved å tilføre varme ved herding av UHPC økes trykkfasthet og E-modul. Herdemetode med varme reduserer krypt og eliminerer synlig krymp. Disse fordelene oppnås også uten å tilføre varme, men gjør at effekten blir redusert og tar lenger tid å oppnå [6, s. 25]. Ved herding på 20 °C oppnår UHPC fortsatt en trykkfasthet over 150 MPa [3, s. 12].

3.4 Brokonstruksjoner og byggemetoder

UHPC har blitt benyttet i brokonstruksjoner som kobling, bæresystem, belegg på brodekker, rehabilitering og rekkverk i verdensdeler som Nord-Amerika, Asia, Europa og Australia (Asia og Australia kan betegnes som Australasia) [3, s. 38]. Bruken av UHPC i Nord-Amerika er fordelt ut både i Canada og i USA [3, s. 20].

I henhold til forprosjektet «UHPC i brobygging» er det blitt konstruert 276 brokonstruksjoner med UHPC som kobling i Nord-Amerika og Europa. 275 av dem er i Nord-Amerika, en av dem er i Europa [3, s. 26-29]. Ved kobling, så benyttes UHPC til å koble sammen andre prefabrikkerte betongelementer på en brokonstruksjon [3, s. 18]. Prefabrikkerte broelementer reduserer byggetid, minimerer trafikkpåkjenninger og øker sikkerheten til arbeidere, samt gir konstruksjonen god bestandighet. Hvordan elementene kobles sammen påvirker derimot bestandigheten og byggetiden til prefabrikkerte elementer. Plasstøpt UHPC har vist seg å være en kreativ løsning som kobling mellom prefabrikkerte betongelementer, og gir en mer langsiktig og robust løsning sammenlignet med andre metoder. Metoden krever lite volum i koblingene, gir enklere løsninger for å koble sammen elementer og har ikke behov for etteroppspanning. Ved å benytte UHPC som et koblingsmateriale informerer FHWA fordeler som at de mekaniske egenskapene til UHPC gjør at koblingsdetaljene i prefabrikkerte broer kan designes og utføres både raskere og lettere [12]. En annen styrke med UHPC som et koblingsmateriale er at den også øker trykkfastheten og motstanden mot ytre inntrengninger i det som kan anses som et svakt punkt på en brokonstruksjon [3, s. 35].

UHPC er også blitt benyttet i rehabilitering og som belegg på brodekker for å gi fordeler som økt trykkfasthet og god motstandsdyktighet. Dette gir konstruksjonene lenger levetid, og samtidig mindre vedlikeholdsbehov [3, s. 19]. UHPC er blitt benyttet som belegg og rehabilitering henholdsvis tre og ni ganger i Nord-Amerika, og to og fem ganger i Europa [3, s. 26 & 29]. God bestandighet og styrke gjør UHPC godt egnet til rehabilitering og som belegg på brodekker. Metoden kan være dyrere enn alternative metoder, men viser til at det reduserer vedlikeholdsbehov i fremtiden, samt øker levetiden til konstruksjonen [3, s. 19]. Siden 2007 har det blitt foreslått å benytte UHPC til å forsterke armerte betongbjelker [2, s. 2]. UHPC som rekkverk er kun blitt benyttet for to brokonstruksjoner i Australasia [3, s. 27].

I henhold til forprosjektet «UHPC i brobygging» er det blitt rapportert ni brokonstruksjoner i Nord-Amerika der UHPC er blitt benyttet som bæresystem [3, s. 26]. I Australasia er det blitt rapportert 21 brokonstruksjoner, og i Europa er det blitt rapportert 14 brokonstruksjoner med UHPC som bæresystem [3, s. 27 & 29].

Avdekket gjennom forprosjektet «UHPC i brobygging» er UHPC angitt som et lovende og innoverende materiale som gir muligheter for raskere byggetid, mindre konstruksjonselementer, mindre behov for vedlikehold og bedre bestandighet [3, s. 12]. For å blande og støpe UHPC er det også tilstrekkelig med vanlig betongutstyr [3, s. 31]. Gjennom tester ble det rapportert at tettheten til UHPC gjør materialet motstandsdyktig mot ytre inntrengninger som blant annet karbonatisering [3, s. 13]. Det er ellers avdekket 70 til 90 UHPC-brokonstruksjoner i Malaysia som er produsert av Dura Technology [3, s. 15].

4 Forskerspørsmål

Hva skal til for at UHPC benyttes i norsk brobygging?

1. Hvilke materialer og materialegenskaper har UHPC?
2. Hva mener bransjen om bruk av UHPC?
3. Hvordan kan UHPC benyttes?

4.1 Avgrensninger

- UHPC blir ansett å inkludere fiberarmering.
- Oppgaven tar for seg tidligere forskning basert på artikler og rapporter utført av andre. Ingen tester eller beregninger er utført i denne oppgaven.
- Miljø- og kostnadsvurderinger er kun vurdert i henhold til avdekket informasjon fra kilder. Det utføres heller ingen beregninger på miljø eller økonomi.
- Oppgaven tar ikke for seg vurderinger om regelverket og standarder for UHPC. Regelverket og standarder blir derimot tema og diskutert der det er aktuelt, men ikke undersøkt eller vurdert ytterligere rundt endringer eller liknende i regelverket.

5 Case

Masteroppgaven er et videre arbeid av forprosjektet «UHPC i brobygging», som ble skrevet høsten 2019, og er laget i samarbeid med Universitet i Agder og Kruse Smith. Oppgaven omhandler hva som skal til for å bruke UHPC (Ultra High Performance Concrete) i norske brokonstruksjoner. Dette inkluderer hvorfor og hvordan UHPC kan benyttes i norske brokonstruksjoner, hvor en stor del av oppgaven var å vurdere bransjens syn om materialet.

E39 Kristiansand – Mandal er en av flere store vegprosjekter som utføres i Norge. Disse vegprosjektene inneholder ofte mange brokonstruksjoner både som motorveg og som overgangsbroer. Brokonstruksjoner kan bestå av plasstøpte konstruksjoner, eller av prefabrikkerte elementer som fraktes og monteres på byggeplass. Uansett vil brokonstruksjonene ofte bestå av store mengder betong og armering. UHPC er et materiale som har et potensiale for å fremme prefab industriren ved at det kan brukes som kobling mellom prefabrikkerte betongelementer. Metoden kan effektivisere og bedre konstruksjoner som på E39-prosjektet.

Som en del av oppgavens mål, ble industrien, eller bransjen, kontaktet for å vurdere og avdekke bransjens syn om UHPC i brokonstruksjoner. Intervjuene ble gjennomført med ønske om at respondentene skulle representere hele bransjen fra prosjektering til kontroll. Dette ble gjennomført for å inkludere hele bransjens synspunkt om UHPC. Bakgrunnsteori og informasjon om UHPC ble innhentet som en del av forberedelsene til intervjuene, og som grunnlag for å diskutere resultatene fra intervjuene i lys av bakgrunnsteori og mot andre resultater. Det var ønskelig at intervjuene avdekket både positive og negative vurderinger om bruk av UHPC for å få en helhetlig vurdering av materialet.

Som en del av resultatene fra intervjuene ble det også oppsøkt informasjon om hvordan UHPC har blitt benyttet. Dette inkluderer også hvorfor det ble benyttet, og medførte at FHWA (Federal Highway Administration) og Dura Technology, fra Nord-Amerika og Malaysia, ble oppsøkt via e-post.

Tidligere bruk og testing av UHPC gav grunnlag for hvordan UHPC kan bidra til brokonstruksjoner. Valg av materialer med tilhørende egenskapsendringer var også i fokus for å forstå hvordan UHPC kan påvirkes, og ble vurdert å være viktig også med tanke på miljø og økonomi. Miljø og økonomi ble vurdert i lik grad som litteraturen og intervjuene, ved at det ble diskutert opp mot alternative løsninger uten at denne oppgaven utførte egne beregninger.

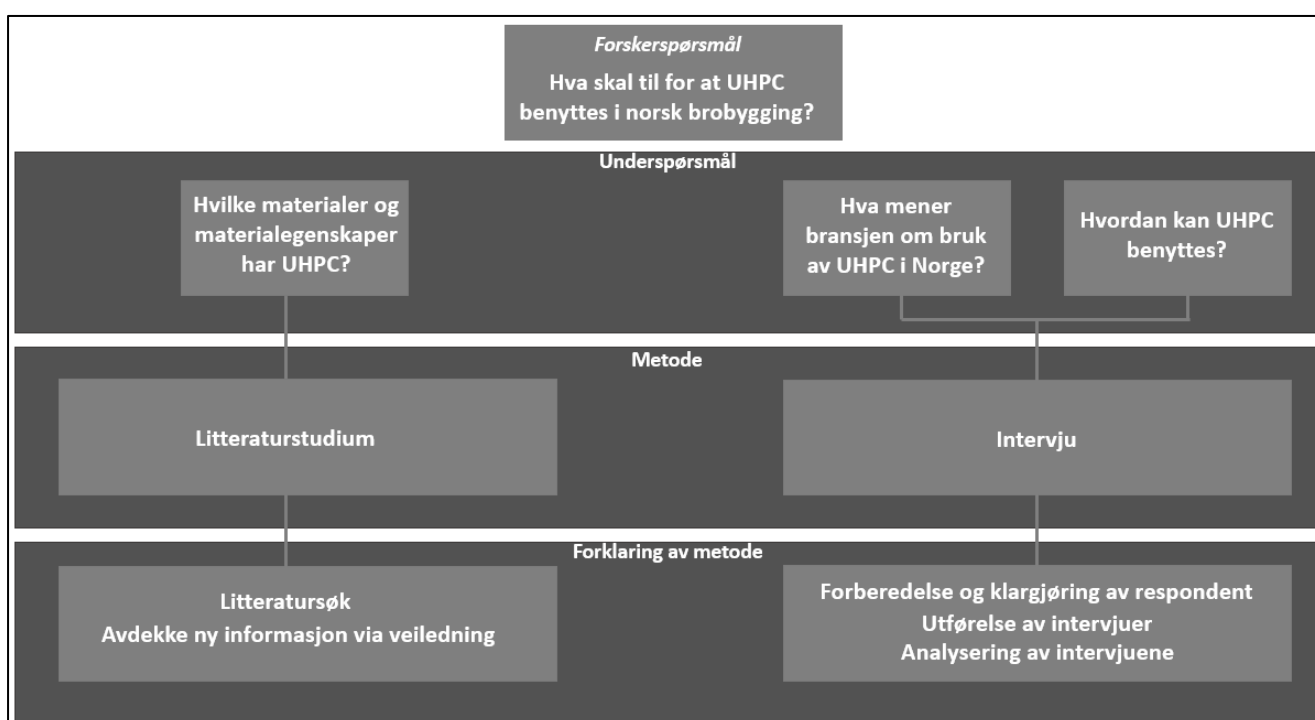
Til slutt vil det vurderes og diskuteres hva som bør ligge til grunn for at UHPC kan benyttes i norsk brobygging. Regelverket og standar må derfor diskuteres i lys av tidligere funn og resultatene avdekket gjennom intervju.

6 Metode

For å besvare forskerspørsmålet med tilhørende underspørsmål ble det benyttet konkrete metoder for innhenting av informasjon. Metodene som ble brukt er intervju og litteraturstudium.

Intervjuene som ble utført var rettet mot betong- og brobransjen for å avdekke deres meninger om UHPC. For å sikre godt forberedte intervjuer ble det tidlig i prosjektet valgt å innhente informasjon fra tidligere funn om UHPC i forprosjektet «Hvordan kan UHPC benyttes i brokonstruksjoner?». Det ble også bestemt at ny informasjon om UHPC, som materialer og materialegenskaper, skulle avdekkes. Intervjuene ble delt opp i tre faser for å kvalitetssikre gjennomførelsen og resultatene av intervjuene.

Figur 6.1 viser en oversikt over metodene som ble brukt, forklaring av metode og hvilken metode som er koblet med tilhørende underspørsmål.



Figur 6.1. Beskrivelse av metoder [13].

6.1 Litteraturstudium

For å besvare forskerspørsmålet ble det valgt å innhente litteratur om materialbruk, materialegenskaper og annen informasjon om UHPC i brokonstruksjoner som var relevant for oppgaven. Noe litteratur ble også innhentet på grunnlag av intervjuforberedelse. Denne litteraturen bidro ikke nødvendigvis med å besvare forskerspørsmålet direkte, men har hatt en innflytelse til introduksjonen om UHPC som ble gitt ved intervjuene av respondentene.

Metodene som ble benyttet for å avdekke den relevante litteraturen var å innhente informasjon fra forprosjektet «UHPC i brobygging», samt å utføre søk i søkemotorer som Science Direct og Google Scholar. FHWA sin rapport «Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community» ble også benyttet for å innhente materialsammensetninger i UHPC som blant annet DUCTAL. Rapporten og kjennskapet til DUCTAL ble avdekket i forprosjektet «UHPC i brobygging». Gjennom veiledningsmøter ble det også avdekket artikler og rapporter som var av interesse for oppgaven.

6.1.1 Søkemetodikk

Utgangspunktet for søkemetodikk ble tidlig bestemt for å avdekke informasjon av interesse for oppgaven og for intervju spørsmålene. Materialegenskaper til betong i brobygging, samt en sammenligning mellom betong og UHPC sine materialegenskaper ble også vurdert som en del av søkemetodikken.

Selv om valg av søkeord ble vurdert i henhold til metodikken, ble det også vurdert at generelle søk om UHPC, med og uten fiberarmering i søkeordet, var viktig for å avdekke nyere forskningsartikler som ikke nødvendigvis ble avdekket under de spesifikke søkeordene.

6.2 Intervju

Boken «Hvordan gjennomføre undersøkelser» av Dag Ingvar Jacobsen ble benyttet som forberedelse til intervjuene for å kvalitetssikre spørsmål, metode og gjennomførelse. Som nevnt i kapittel 6.1 er også litteraturstudium med på å kvalitetssikre spørsmålene til intervjuene.

Intervju kan deles opp i fire metoder: ansikt-til-ansikt, telefon, chat og e-post [14, s. 147]. Intervju over e-post ble valgt som intervjumetode av grunner som geografisk hindring, tilgang til respondenter og ferdig transkriberte intervjuer [14, s. 148]. Valg av intervjumetode ble bestemt ved å vurdere fordeler og ulemper, der fordelene ved e-post stilte sterkere enn ulempene.

Intervju over e-post gir enkel tilgang til personer og intervjuet kommer ut ferdig transkribert. Metoden kan foregå over lang tid, noe som gir muligheter for refleksjon. Metoden kan derimot by på utfordringer der samtalen kan gå over lang tid. E-postmetoden er svak på å bygge tillit og intervjuer har lite kontroll over intervjusituasjonen. Informasjonen i e-postintervjuet er komprimert og metoden er en anonym kanal [14, s. 148].

Det ble valgt å utføre metoden for intervju i følgende tre faser: forberedelse, utførelse og analysing. Forberedelsen inkluderte å ta kontakt med respondentene før undersøkelsen, samt avdekke bakgrunnsteori fra rapporter og artikler. De to resterende fasene var å utføre intervjuene, samt analysere resultatene og koble det opp mot bakgrunnsteori.

Etter valg av type intervju, ble det bestemt at 12 respondenter skulle intervjues. De 12 respondentene skulle representere følgende bransje: byggherre, utførende, produsent og prosjekterende. Oppgaven tok primært for seg respondenter i betong- og brobransjen i Norge. Valg av respondent ble bestemt på blant annet grunnlag av anbefalinger fra veiledere og arbeidskollegaer. 14 mulige kandidater for intervju ble kontaktet der 11 svarte med samtykke om å stille opp til intervju.

Av hensyn til oppgaven ble det vurdert at seks besvarelser var tilstrekkelig for å kunne analysere bransjens mening om UHPC. Begrunnelsen for dette valget var basert på et mulig scenario der ikke alle respondentene gav svar, og at det var realistisk å forvente minst seks besvarelser. Seks besvarelser ville gitt et middels grunnlag for bransjens mening om UHPC, gitt at besvarelsene representerte flere bransjer. Nye intervjuobjekter ville blitt kontaktet dersom antall besvarelser ikke var tilstrekkelig.

Definisjon på hvem som tilhører den spesifikke bransjen er gjort i henhold til deres kjente rolle ved norsk brobygging. Respondenter kan ha hatt forskjellige roller tilhørende forskjellige bransjer som erfaring. Det var derfor viktig å sikre at erfaring også blir tatt med i intervju spørsmålene. Det var også ønskelig å intervju like mange respondenter med erfaring fra hver bransje.

Oppdeling av respondent i henhold til bransje var kanskje ikke nødvendig, men et tiltak som ble gjort for å ha mulighet til å sortere svarene i henhold til bransjen, noe som kan ha vært nødvendig for resultatene. Erfaring ble også vurdert som et sorteringskriterium.

Spørsmålene som ble sendt ut til respondentene var identiske, uavhengig av bransje eller erfaring. Dette skyldes at oppgaven var interessert i eventuelle forskjellige meninger om de samme temaene. Oppgavens tidsbegrensning var også medvirkende i avgjørelsen. Respondentene ble gitt en tidsfrist på 2 uker til å besvare spørsmålene. Det ble også lagt ved en introduksjon om UHPC for å gi

respondentene et innblikk i materialet. Intervjuspørsmålene og tilhørende introduksjon er gitt i *Vedlegg 4 Intervju – UHPC i brobygging i Norge*.

Respondentene ble kontaktet før utførelsen av intervjuene for å sikre interesse i deltakelse av intervjuet. Ved eventuelle tilfeller der en respondent ikke ønsket å stille opp, ble det forespurt en ny mulig kandidat for intervjuet. Denne kontakten ble opprettet via telefon, e-post eller møter der dette var mulig. Opprettelse av kontakt med respondent før intervjuet, samt anbefalinger av mulige respondenter via bekjente, bistod oppgaven med å utføre intervjuer med respondenter som har kjennskap og kunnskap til betong og/eller brobygging. Ved presentasjon av intervjuene i rapporten vil respondentenes bransje og erfaring bli belyst, men ellers vil svarene være anonyme. Den ene respondenten uttrykket et ønske om å gå gjennom spørsmålene i lag med intervjuer. For å sikre deltagelse ble dette ønsket opprettholdt. Påminnelse om intervjuet ble sendt ut til respondentene som ikke hadde besvart intervjuet to uker etter det var sendt. Intervjuet ble lagt ved for å forenkle besvarelsesprosessen.

Noen av respondentenes svar ble fulgt opp av enten oppfølgingsspørsmål eller svar der de stilte spørsmål tilbake i intervjuet. Noen spørsmål ble stilt av ren interesse og ble ikke nødvendigvis tatt med i rapporten. Noen av oppfølgingsspørsmålene ble inkludert i resultatet av intervjuene, men ikke tydeliggjort som oppfølgingsspørsmål. Grunnlaget for dette er at det primært omhandlet spørsmålene som ble stilt, og kunne fint presenteres som en del av intervjuet.

NVivo ble vurdert som en metode for å kartlegge og systematisere intervjuene med ordsky, men ble valgt vekk på grunnlag av at intervjubesvarelsene var unike og ikke egnet for disse intervjuene.

Det ble også valgt å oppsøke kontakt med FHWA og Dura Technology. Dura Technology står for over 70 UHPC-brokonstruksjoner i Malaysia [3, s. 15]. FHWA har rapportert over 300 brokonstruksjoner i UHPC over hele verden, der nesten 300 konstruksjoner alene er i Nord-Amerika [3, s. 20 - 29]. Det ble sendt spørsmål til både FHWA og Dura Technology, som var av interesse for oppgaven, samt en bekreftelse om å kunne benytte denne informasjonen i masteroppgaven. Grunnlaget for å oppsøke kontakt var å blant annet avdekke hvorfor de har valgt å benytte UHPC som et materiale for brobygging, og hvordan de har klart å fremme produktet.

Gjennom dialog med FHWA ble rapporter, artikler og nettsider avdekket som var av interesse for oppgaven. Denne dialogen avdekket også en rapport fra FHWA som vurderte tidligere bruk av UHPC i brokonstruksjoner i Nord-Amerika. Rapporten ble valgt å ha en stor innflytelse på oppgaven der dette kunne reflekteres mot intervjuresultater og andre resultater som belyser og svarer på forskerspørsmålet.

Dialogen mellom FHWA og Dura Technology ble, i likhet med intervjuene, også valgt å presenteres anonymt i rapporten. Dialogene blir sortert og presentert i henhold til aktør, FHWA eller Dura, men navnene til de som deltok i dialogen ble valgt å holdes anonym.

6.2.1 Intervjugjennomføring

Ved gjennomføring av intervju er det viktig å være godt forberedt. Begrunnelse for valg av intervjuobjekt, deres bakgrunnsinformasjon og forberedelse om tema er viktig for å sikre intervjusituasjonen. Det er også viktig at respondent er informert om tema og intervjuerens hensikt i forkant av intervju [14, s. 155]. For slike intervjuer er det viktig at respondenten styres i minst mulig grad [14, s. 156].

7 Resultat

Resultatene som presenteres i dette kapittelet omhandler materialer, materialegenskaper og materialsammensetning til UHPC, bransjens meninger om UHPC avdekket gjennom intervju, informasjon avdekket gjennom dialog med FHWA og Dura Technology, og hvordan UHPC kan benyttes avdekket gjennom rapporter.

7.1 Materialer, egenskaper og sammensetninger

Dette kapittelet tar for seg artikler og rapporter om materialer, sammensetninger og egenskaper til UHPC. Det er rapportert forskjellige sammensetninger og forsøk på forskjellige materialer som kan påvirke egenskapene til materialet. Blant annet er rapporten «Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community» til FHWA (Federal Highway Administration) blitt benyttet og presentert i dette kapitelet.

7.1.1 Materialsammensetninger gitt av FHWA

I FHWA sin rapport «Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community» er det oppgitt flere materialsammensetninger for UHPC. Noen av disse er presentert i dette kapittelet [6, s. 5 - 8]. For de følgende materialsammensetningene er det ikke avdekket tilhørende egenskaper.

Tabell 7.1 viser en oversikt over materialsammensetningen av DUCTAL, som er den mest brukte UHPC-blandingen i Nord-Amerika [6, s. 5].

Tabell 7.1. Sammensetning av UHPC-blandingen DUCTAL gitt i FHWA rapport [6, s. 5].

Materialer	kg/m ³	Prosent av vekt
Portlandsement	712	28,5
Fin sand	1020	40,8
Mikrosilika	231	9,3
Kvarts	211	8,4
Superplastiserende tilsetningsstoff	30,7	1,2
Akselererende tilsetningsstoff (Aksellerator)	30	1,2
Stålfiber	156	6,2
Vann	109	4,4

Teichmann og Schmidt, gitt i FHWA rapport, rapporterte bruk av blandingene som vist i tabell 7.2 for å studere bestandigheten til UHPC. Miks 1 hadde 8 mm som maks størrelse på tilslaget som sand. Miks 2 hadde det største tilslaget på 8 mm som basalt [6, s. 7].

Tabell 7.2. UHPC-sammensetning av Teichmann og Schmidt [6, s. 7].

Materialer	Miks 1	Miks 2
	kg/m ³	kg/m ³
Sement	733	580
Silika-pulver	230	177
Kvarts 1	183	131
Kvarts 2	0	325
Superplastiserende tilsetningsstoff	32,9	33,4
Sand	1,008	354
Basalt	0	711
Stålfiber	194	192
Vann	161	141
Vann-bindemiddel forhold	0,19	0,21

Silika-pulver, også definert som Silica-mel, er et bindemiddel som er veldig finkornet splittet silica. Det lages ved å bryte ned silica, som kvarts, til fint pulver. Definisjonen er gjort i henhold til ACI (American Concrete Institute) sin terminologiliste [10, s. 59].

En UHPC-klasse navngitt som Cor-Tuf, utviklet i USA, har følgende materialer og forhold som gitt i tabell 7.3 [6, s. 7].

Tabell 7.3. UHPC-klassen Cor-Tuf [6, s. 7].

Materialer	Proporsjoner
Portlandsement	1
Sand	0,967
Silika-pulver	0,277
Mikrosilika	0,389
Superplastiserende tilsetningsstoffer	0,0171
Stålfiber	0,310
Vann	0,208

I Paris er det blitt utviklet en UHPC-klasse kalt CEMTEC_{multiscale} som vist i tabell 7.4 [6, s. 7].

Tabell 7.4. UHPC-klassen CEMTEC_{multiscale} [6, s. 8].

Materialer	kg/m ³
Portlandsement	1050
Sand	514
Mikrosilika	268
Superplastiserende tilsetningsstoff	44
Stålfiber	858
Vann	180

7.1.2 Materialsammensetninger- og egenskaper avdekket i artikler

Dette kapittelet presenterer primært to artikler hvor de endret innholdet i UHPC-blandingen for å vurdere endringene til materialet.

Zhu et al. vurderte bruken av UHPC for å styrke bøyestrekfastheten av eksisterende armerte betongbjelker. Råmaterialene som ble benyttet til UHPC-prøvene var sement, kvarts, flyveaske, mikrosilika, kvartssand, superplastiserende tilsetningsstoffer og stålfiber [2, s. 1]. Eksperimentene viste at bruken av UHPC ga en økning på bøyestyrken til bjelker fra 0 til 400 %, og at metoden hvor UHPC ble påført på strekksiden av betongbjelken var metoden som gav best resultat [2, s. 18]. Totalt vurderte de 95 bjelker i artikkelen sin [2, s. 2]. Det er ikke avdekket tall i henhold til prosent økning av bøyestyrken.

Endringer i materialegenskaper i henhold til fiberinnhold

Abbas et al. observerte at en økning av fibervolumet reduserte flyteevnen til UHPC [5, s. 431]. I artikkelen tok de for seg endringer i mekaniske- og bestandighetsegenskaper ved forskjellige mengder fiberarmering; 1 %, 3 % og 6 % av volumet, og ved forskjellige lengder av stålfiberne; 8 mm, 12 mm og 16 mm. Stålfiberne hadde en konstant diameter på 0,2 mm med en strekkfasthet større enn 2850 MPa. I tillegg til stålfiber ble følgende materialer benyttet i UHPC-blandingene: Portlandsement, mikrosilika, kvartssand, kvartspulver og superplastiserende tilsetningsstoffer. UHPC-blandingen ble bestemt i henhold til testing og anbefalinger av andre studier [5, s. 430].

Tabell 7.5 viser en sammenheng mellom prosent stålfiber, lengden på stålfiber, trykkfastheten og E-modulen. I henhold til artikkelen skrevet av Abbas et al. ble det observert sprøe brudd for UHPC-blandingene uten fiberarmering. Prøvene med fiberarmering viste derimot duktile brudd [5, s. 432].

Tabell 7.5. Trykkfasthet og E-modul i henhold til lengde og mengde fiberarmering [5, s. 432].

Miks:	Stålfiber		Trykkfasthet (MPa)			E-modul (GPa)		
	Lengde (mm)	Dose (%)	7 d	28 d	56 d	7 d	28 d	56 d
1	-	-	131	151	160	35,6	42,6	45,9
2	8	1	135	156	165	35,2	42,1	45,3
3		3	142	164	174	35,9	42,5	45,1
4		6	148	171	181	35,6	42,8	45,8
5	12	1	135	158	165	35,8	42,3	45,5
6		3	141	166	176	35,1	42,8	46,1
7		6	147	173	184	34,9	42,3	45,4
8	16	1	137	159	167	35,6	43,4	45,7
9		3	143	165	175	35,1	42,1	46,2
10		6	149	170	185	35,8	42,9	45,3

Tabell 7.6 viser strekkfastheten til UHPC-blandingene gitt av prosentmengde og lengde av stålfiberne. Tiden ved brudd økte i samhold med herdetiden. Mengde stålfiber påvirket også strekkfastheten [5, s. 433].

Tabell 7.6. Strekkfasthet over gitt antall døgn i henhold til lengde og mengde stålfiber [5, s. 433].

Miks	Stålfiber		Strekkfasthet (MPa)		
	Lengde (mm)	Mengde (%)	7 d	28 d	56 d
1	-	-	8,1	9,4	10,1
2	8	1	16,0	17,6	18,3
3		3	20,2	21,9	22,1
4		6	38,2	39,8	40,1
5	12	1	15,6	15,6	16,2
6		3	18,7	19,7	20,2
7		6	35	36,2	37,1
8	16	1	12,8	13,9	14,5
9		3	17,9	18,9	19,5
10		6	32,7	33,8	34,6

Konklusjonen til Abbas et al. var at å øke lengden på fiberarmingen ikke påvirket trykkfastheten på UHPC-miksene. Økning av mengde fiber gav en liten økning av trykkfastheten og gjorde materialet veldig duktilt. Økning av mengde fiberarming gav også en stor økning av materialets strekkfasthet og bøyestyrke [5, s. 439].

Endringer i materialeegenskaper i henhold til materialer og fiberinnhold

Yu et al. vurderte fiberarmert UHPC med lavt sementinnhold, hvor kalkstein og mikrosilika ble benyttet for å erstatte deler av sementen. Målet med artikkelen var å oppnå en tettpakket UHPC-matrise. Som vist i tabell 7.7 var sementen som ble benyttet vanlig Portlandsement, CEM I 52,5 R. To typer sand ble brukt, normal sand 0-2 mm og mikrosand 0-1 mm. Stålfiberne som ble brukt var 13 mm lange og 0,2 mm i diameter [7, s. 30]. Resten av materialene som ble benyttet er vist i tabell 7.7.

Tabell 7.7. Materialer benyttet i UHPC-blandingen rapportert av R. Yu et al. [7, s. 30].

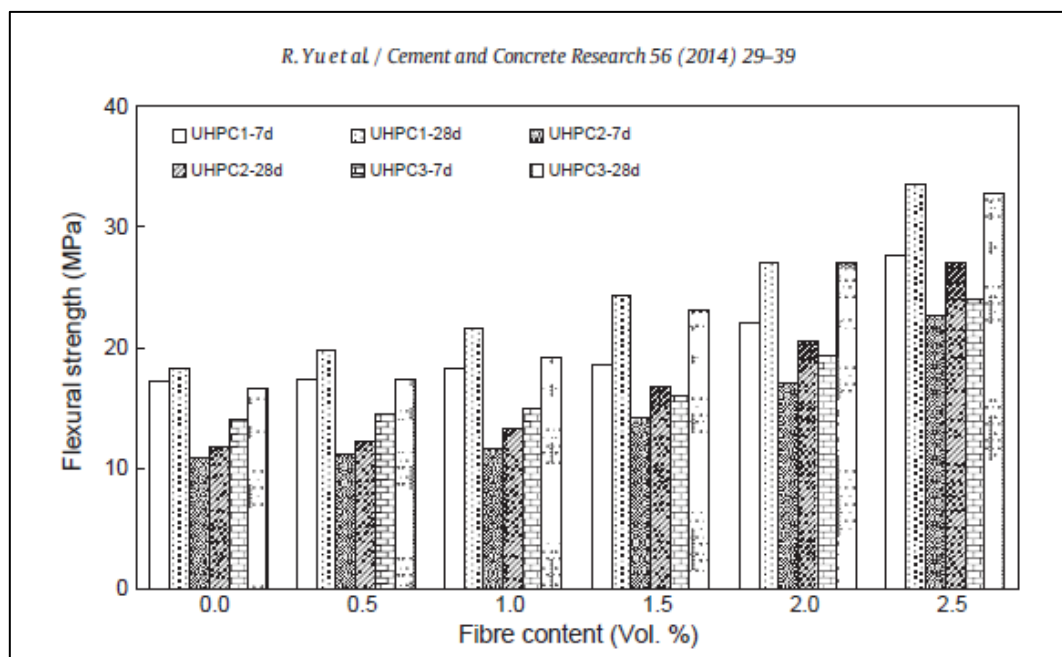
Materialer	Type	Spesifikk densitet (kg/m ³)
Sement	CEM I 52,5 R	3150
Fyllmasse 1	Kalkstein	2710
Fyllmasse 2	Kvarts	2660
Fin sand	Mikrosand	2720
Grov sand	Sand 0-2	2640
Mikrosilika	Mikro-Silica	2200
Superplastiserende tilsetningsstoff	Polycarboxylate ether	1050
Fiber	Stålfiber	7800

Som Tabell 7.8 viser ble det benyttet tre forskjellige UHPC-resepter der noe sement ble delvis erstattet av materialer som kalkstein og kvarts [7, s. 31].

Tabell 7.8. Tre UHPC-resepter gitt i rapporten av R. Yu et al [7, s. 31].

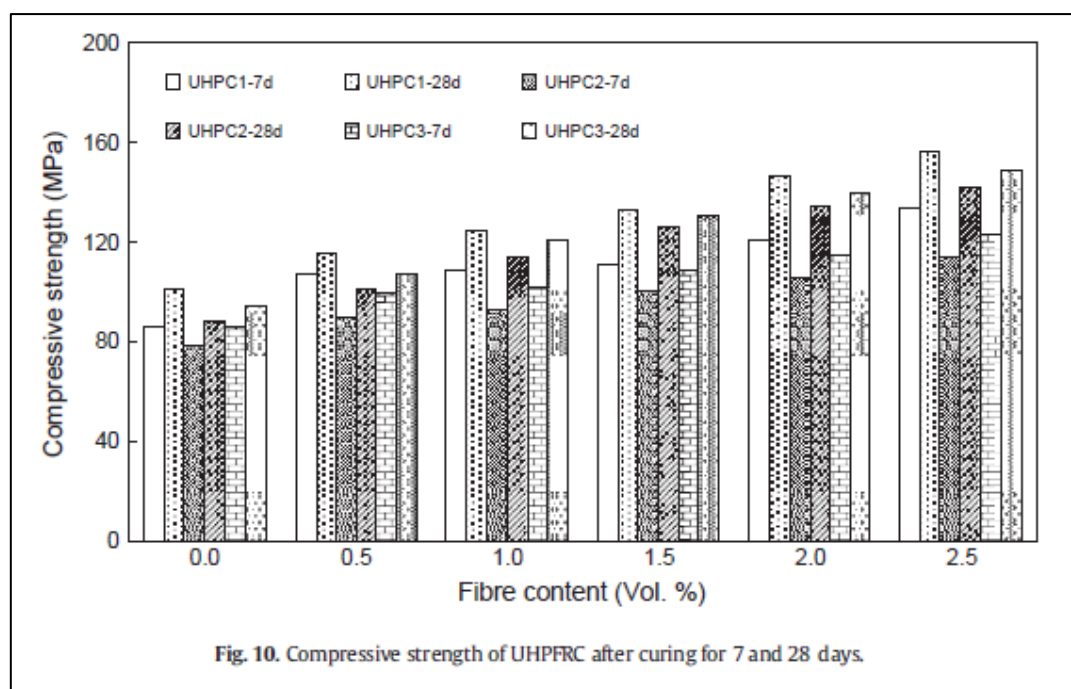
Materialer	UHPC 1 (kg/m ³)	UHPC 2 (kg/m ³)	UHPC 3 (kg/m ³)
CEM I 52,5 R	874,9	612,4	699,99
Kalkstein	0	262,5	0
Kvarts	0	0	175
Mikrosand	218,7	218,7	218,7
Sand 0-2	1054,7	1054,7	1054,7
Mikrosilika	43,7	43,7	43,7
Vann	202,1	202,1	202,1
Superplastiserende tilsetningsstoff	45,9	45,9	45,9
Vann/semest forhold	0,23	0,33	0,29

Figur 7.1 viser bøyestykken til UHPC-reseptene etter 7 og 28 døgn, i sammenheng med prosent fiberinnhold [7, s. 35].



Figur 7.1. Bøyestykken til de tre UHPC-reseptene i henhold til volum fiberinnhold [7, s. 35].

Figur 7.2 viser trykkfasthetene for de forskjellige UHPC-reseptene [7, s. 35].



Figur 7.2. Trykkfastheten til de tre UHPC-reseptene i henhold til volum fiberinnhold [7, s. 35].

I henhold til rapporten skrevet av Yu et al. økes bøyestykken og trykkfastheten i samhold med økning av fiberarmering. Med 2,5 % fibervolum oppnådde prøvene, etter 28 dagers herdetid, som presentert i tabell 7.9 [7, s. 35].

Tabell 7.9. Bøyestrekfasthet og trykkfasthet etter 28 dagers herdetid [7, s. 35].

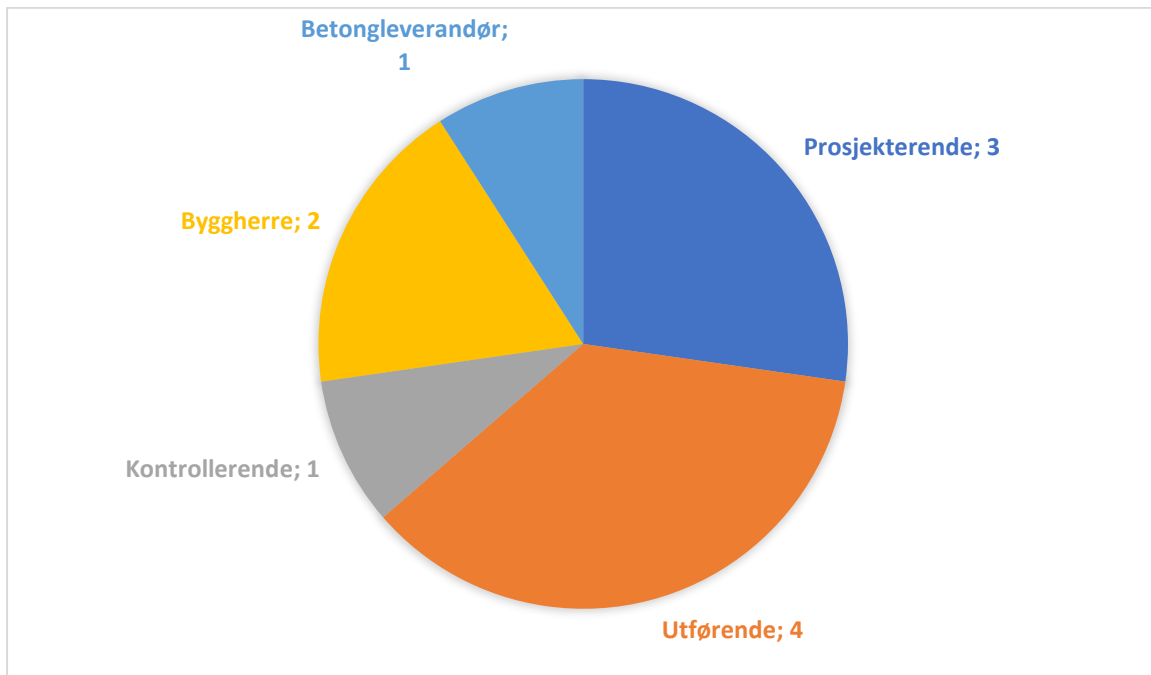
UHPC-blanding:	Bøyestykke (MPa)	Trykkfasthet (MPa)
UHPC 1	33,5	156
UHPC 2	27	141,5
UHPC 3	32,7	148,6

Som en konklusjon i artikkelen skrevet av Yu et al. er det mulig å lage en godt pakket UHPC med lave mengder bindemiddel (rundt 650 kg/m³), og samtidig opprettholde en høy trykkfasthet og bøyestykke. Ved å benytte fyllmasser som kalkstein og kvarts som en erstatning til noe av sementen kan dette bidra til både økonomiske og miljø-gevinster ved å redusere behovet for mikrosilika. Dette kan også bedre flyten til materialet og øke effektiviteten til fiberarmeringen og bindemiddelet [7, s. 37-38].

7.2 Intervju av betong- og brobransjen

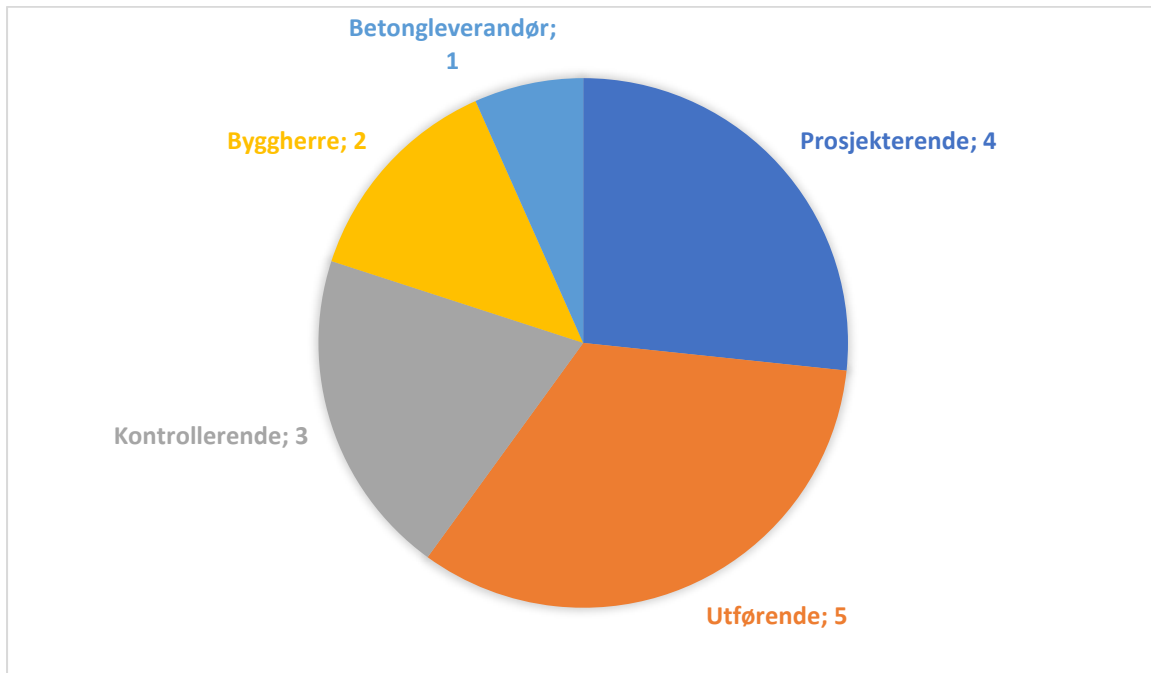
Bransjens meninger ble etterspurt gjennom intervju som en del av metoden for å besvare forskerspørsmålene gitt i oppgaven. Dette kapitlet presenterer svarene fra noen av spørsmålene som ble stilt i intervjuene av den norske betong- og broindustrien. Spørsmålene er vedlagt i *Vedlegg 4 Intervju – UHPC i brobygging i Norge*. Ni av elleve respondenter besvarte intervjuene.

Figur 7.3 viser fordelingen av respondentenes rolle i industrien. Diagrammets oppdeling er basert på svaralternativer. Byggherre og kontrollerende kan anses å ha liknende rolle, men siden svarene ble presisert blir dette også presentert for seg selv.



Figur 7.3. Respondentenes rolle i industrien [13].

Respondentenes erfaring er vist i figur 7.4, og varierer fra 20 til 33 år med brokonstruksjoner og/eller betong.



Figur 7.4. Respondentenes erfaring med broer eller betong [13].

Alle respondentene hadde hørt om UHPC, mens tre av respondentene var kjent med betydningen av dens materialegenskaper.

7.2.1 Utfordringer med dagens betongbrokonstruksjoner

I forkant av intervju spørsmålene om UHPC ble det stilt spørsmål om hva som er utfordringer med dagens brokonstruksjoner. I henhold til respondentene har dagens brokonstruksjoner utfordringer med bestandighet, riss, svinnriss spesielt på kantdragere, store vedlikeholdskostnader (spesielt for prefabrikkerte brokonstruksjoner), utførelse av overdekningskrav og ytre inntrengninger som klorider. Store brokonstruksjoner har også utfordringer med stivhet og stor egenvekt. Slakkarmerte brokonstruksjoner har begrensninger med korte spenn, og klimaregnskap for dagens brokonstruksjoner i betong blir også sett på som en utfordring. Flere respondenter påpeker begrensede muligheter for industrialisering og manglende oppnåelse av god bestandighet.

Prefabrikkerte brokonstruksjoner resulterer ofte i store vedlikeholdsflater, og det møtes også utfordringer ved lagerløsninger. Det er også utfordringer med vedlikehold og robusthet sammenlignet med plasstøpte brokonstruksjoner i betong. Byggetid og HMS blir derimot ansett som fordelaktig for prefabrikkerte brokonstruksjoner.

Gamle brokonstruksjoner har dårlig bestandighet og ofte lav overdekning, der mange konstruksjoner må vedlikeholdes, rehabiliteres eller skiftes ut mer enn planlagt før deres tiltenkte levetid.

Dagens betongbrokonstruksjoner har også konkurranse fra både tre- og herdeplastløsninger. Prefabrikkerte brobjelker er også langt mindre utbredt i Norge sammenlignet med Vest-Europa og Nord-Amerika.

7.2.2 Bransjens meninger om UHPC

Etter en kort introduksjon om UHPC ble respondentene stilt spørsmål om bruk av UHPC i norsk brobygging. Noen av respondentene stilte tvil til varmeutvikling og riss i materialet. Flere respondenter reagerte også på at overdekningen kunne reduseres helt ned til 19 mm. Det ble også stilt tvil til bruk av stålfiber og om dette kunne gi grunnlag for korrosjonsskader.

I henhold til en respondent vil det å redusere tverrsnittet ha en stor betydning på mengde betong, noe som respondenten anser som positivt med tanke på egenvekt og bruk av mengde betong. I henhold til en annen respondent jobbes det hardt med å redusere mengder for betong og armering, og ser derfor på UHPC som et potensiale for å bidra med dette.

Noen av respondentene vurderte bruken av UHPC som interessant, men at det må introduseres forsiktig for å oppnå erfaring. Blant annet blir ikke fiberarmering per dags dato benyttet som konstruktiv armering i bruer. Mindre områder som er utsatt for mye last og/eller ytre miljø er derimot et mer aktuelt bruksområde. Flere av respondentene så også et større potensiale med bruk av UHPC i betongrehabilitering.

Respondentene ble introdusert for fem bruksområder som UHPC tidligere har blitt benyttet til rapportert primært fra FHWA sine rapporter. Bruksområdene som ble introdusert var UHPC som et koblingsmateriale mellom andre konstruksjonselementer, bæresystem i form av bjelker, rehabilitering ofte på brodekker, belegg på brodekker og rekkverk [3, s. 26, 27 & 29].

Flere respondenter så muligheten ved å benytte UHPC som et koblingsmateriale mellom andre elementer. Det ble også påpekt at dette virket gjennomførbart siden det er store krav til koblinger med tanke på miljø og belastning.

UHPC som bæresystem ble vurdert av en respondent som positivt siden dette resulterer i slankere bjelker, som gir mindre betongbruk og kan bidra til reduksjon av kostnader. Det ble påpekt at det da er viktig at UHPC vurderes i hele prosjekteringsfasen for å unngå at forutsetningene endres underveis. Ved å kunne redusere overdekningen føres det også til mindre betong og slankere konstruksjoner. Flere av respondentene svarte at de så mulighetene med UHPC som bjelker for å oppnå lenger spenn eller et mindre tverrsnitt. En av respondentene så for seg muligheten med å prefabrikkere UHPC-bjelker og dekker som for eksempel MOT-bjelker. En av respondentene så derimot problemer med fiberarmeringen i UHPC-bjelker, siden dette ikke benyttes per dags dato. Det ble også stilt tvil til om det er mulig å oppnå duktilitet og konstruksjonssikkerhet ved bruk av UHPC, samt at innblandingen av fiber er et usikkerhetsmoment der fiberne kan være utfordrende å få jevnt fordelt. Det blir påpekt at dersom det er aktuelt, så bør det gås forsiktig frem.

UHPC som rehabiliteringsmateriale var de fleste respondentene positive til, spesielt til å reparere gamle brokonstruksjoner, brodekker, samt forsterke gamle konstruksjonselementer. En av respondentene svarte at dersom UHPC samvirker godt med eksisterende bro kunne dette være interessant.

UHPC-belegg på brodekker ble også vurdert av noen respondenter å være interessant der muligheten for høyere bestandighet er en positiv faktor. De fleste respondentene så derimot ikke potensiale i UHPC som et belegg på brodekker, spesielt ikke hvis dette var ment å erstatte asfalt.

UHPC som rekkverk ble vurdert å være interessant som et alternativ for tradisjonell betong. Dette kan i henhold til bransjen også bidra til høyere bestandighet og redusert overdekning, og vil ha en

stor betydning for prosjekteringsarbeidet. Selv om de fleste respondentene så muligheter med UHPC-rekkverk ble det likevel påpekt at krav må ivaretas og at det kan være en utfordring med å oppnå riktig stivhet. UHPC ble vurdert å ha store muligheter som rekkverk hvis det støpes monolittisk med brodekket. En annen respondent påpeker at regelverket ikke er til å komme unna. Overdekningskrav er noe som per dags dato ikke kan avvikes fra, men hvis UHPC gir rom for endring i overdekningskrav ville det vært et reelt alternativ for bygging av brokonstruksjoner. Fordel med lavere vekt blir også påpekt å ha en stor positiv betydning.

Pris og klima ble også vurdert av respondentene som utfordringer ved bruk av UHPC i brokonstruksjoner. Det ble stilt spørsmål og tvil til utstøpingsmetode, herdetiltak, regelverk på bakgrunn av strenge rutiner, økonomi, og at bruken av UHPC ikke er blitt testet enda i Norge. I henhold til bransjen antas det også at UHPC har et stort svinnpotensial som kan føre til opprissing på sikt, og at høy E-modul ikke alltid er fordelaktig. En respondent påpeker også at stive konstruksjoner får veldig store krefter på grunn av påsatte deformasjoner som temperaturendringer, svinn og setninger. Noen respondenter påpeker også manglende materialkunnskap, regelverk og erfaring i bransjen, og at kostnader mest sannsynlig er store. Andre respondenter mener at standarder må på plass først, og at det deretter vil være mulig å vurdere konsekvensene og ta stilling til spørsmål for utførende. En av respondentene mener at UHPC som et plasstøpt materiale i Norge møter på utfordringer med støpearbeid på byggeplass. Det menes også at UHPC har blitt mest benyttet i regioner som har et mer tilgivende klima enn Norge, og at det derfor er mer sannsynlig at UHPC blir benyttet som et prefabrikkert element som blir støpt i et kontrollert miljø på fabrikk.

En annen respondent påpeker også utfordringen med krav til armering og overdekning. Selv om UHPC kan gi et redusert behov for dette er det fortsatt gitt minstekrav i regelverket.

I henhold til en respondent er UHPC som annen betong og kan benyttes til det meste, men er kanskje ikke den best mulige løsningen til alt.

7.2.3 Bransjens meninger om hvordan UHPC kan benyttes

Dette kapittelet presenterer svarene til spørsmålene som ble stilt i intervjuene av den norske betong- og brobransjen, som omhandlet hvordan respondentene mente UHPC kunne benyttes, eller hva som eventuelt måtte gjøres for å kunne benytte materialet.

Som svar på forslag til andre bruksområder som UHPC kan benyttes til ble MOT-bjelke-broer nevnt av en respondent. Tanken var da at disse bjelkene kan bli slankere, enklere å transportere samt lettere å heise på plass. Andre respondenter nevnte også prefabrikkerte elementer som et forslag til UHPC, der store spenn ble nevnt som faktorer bak vurderingen.

Det ble også nevnt andre bruksområder til UHPC, som undervannskonstruksjoner, flytebrygger, brodekke hvor en også unngår bruk av topeka, reparasjoner, jernbanesviller, peler, forsterkning i tunneller, rekkverk, badroms-moduler, hulldekker, plattendekker og fasadeelementer. Også balkongplater, trapper og generelt andre konstruksjonselementer hvor det tillates mindre overdekning ble nevnt av en respondent som bruksområder til UHPC.

Ved spørsmål om hvilke muligheter eller potensiale UHPC har for å bli brukt i norsk brobygging besvarte respondentene at så lenge standarder, godkjenninger for bruk og forutsetninger blir mer synliggjort, kan det være store muligheter for materialet. Det kan også være aktuelt å benytte UHPC i mindre områder, som lager, som er særlig utsatt for påkjenninger av enten last eller ytre miljø.

En av respondentene så muligheter med UHPC som eller med elementer, hvis byggetiden kunne reduseres ved å blant annet unngå nedstenging av trafikkgjennomgang. Det kan da være fordelaktig siden byggetiden kan reduseres betraktelig som for brokonstruksjoner over eksisterende veier eller jernbaner.

Ved å redusere materialbruk, påpeker en av respondentene at brobygging kan bli billigere og mer bærekraftig, så lenge CO₂-avtrykket for UHPC er mindre enn alternativ betong. Også bruk av UHPC i prefab-industrien og industrialisering av byggemetoder med nye materialer og løsninger kan være et potensiale med UHPC.

En av respondentene så derimot ingen muligheter eller potensialer med bruk av UHPC i norsk brobygging, mens en annen respondent mente at et slikt materiale i hvert fall bør prøves ut.

Ved spørsmål om hva som skal til for at UHPC skal tas i bruk i Norge som et byggemateriale besvarte respondentene med at fordeler og bruksområder for materialet måtte være dokumentert. Materialet må også være konkurransedyktig med tanke på priser og miljø (klimavennlig). Det ble påpekt at materialet kan gi mindre tverrsnitt og høyere bestandighet, men at dokumentasjon av fordeler og ulemper ved bruk av materialet er viktig. Noen må også være villig til å ta en nødvendig risiko for å få materialet inn på markedet. UHPC må også introduseres til bruksområder hvor det kan forventes å fungere bra, for å fremme produktet. Det blir også påpekt at utfordringen med et materiale som UHPC er retningslinjer og standarder, og at dette er grunnlaget til at ingen benytter materialet. Overdekningskrav må også vurderes i regelverket for å få denne redusert for UHPC. Det er også viktig at alternativer løsninger blir åpnet opp for allerede i anbudsrunder.

I henhold til en av respondentene har allerede UHPC blitt benyttet innen reparasjoner og på overflater på brokonstruksjoner i flere år i Norge. Utfordringen med materialet på broer er at det sprekker opp på grunn av sprøhet.

Andre respondenter mener at statlige aktører som Statens Vegvesen, Vegdirektoratet og Nye Veier må utprøve materialet. UHPC bør bli mer kjent og introduseres forsiktig i mindre skala for å skaffe mer erfaringsgrunnlag. Formidling av materialkunnskap og erfaring ved bruk av materialet blir også sett på det som må til for at produktet skal kunne benyttes. Først da kan et referanseprosjekt presenteres.

Som en avslutning av intervjuene ble det stilt spørsmål om respondenten hadde noe annet å tilføye. Respondentene svarte med at UHPC virket som et spennende alternativ til standardbetong, særlig til kantdragere, så sant det ikke risses opp. Andre påpekte at det måtte være mer tilgjengelig kunnskap om produktet i Europa for at materialet kan tas i bruk, og at det må mer forskning og utprøving til. Staten må også engasjere med stønader eller stipender for at aktører skal prøve ut produktet samt benytte det. Det blir også belyst at det er synd at en konservativ bransje forhindrer muligheter for å ta i bruk løsninger som i mange tilfeller kan være bedre enn det som ellers blir benyttet.

7.3 Hvordan UHPC kan benyttes

Dette kapitlet presenter hvordan UHPC kan benyttes i brokonstruksjoner, gitt av FHWA-rapporter (Federal Highway Administration), samt hvorfor UHPC benyttes, avdekket gjennom dialoger med FHWA og Dura Technology. Metodene som er blitt rapportert for bruk av UHPC er som bæresystem, kobling, rekkverk, belegg og rehabilitering [3, s. 26].

7.3.1 Hvorfor UHPC benyttes

Dette kapitlet presenterer hvorfor UHPC benyttes, avdekket gjennom dialog via e-post med FHWA i Nord-Amerika, og Dura Technology i Malaysia.

Federal Highway Administration (FHWA)

FHWA i Nord-Amerika ble kontaktet for å avdekke hvorfor UHPC ble valgt som et konstruksjonsmateriale i nesten 300 brokonstruksjoner i Nord-Amerika, og hva som var grunnlaget for de forskjellige bruksområdene for materialet [3, s. 26].

Metodene som er blitt benyttet i Nord-Amerika er UHPC som bæresystem, kobling, belegg og rehabilitering, som nevnt i kapittel 7.3 *Hvordan UHPC kan benyttes* [3, s. 26].

I henhold til FHWA, er byggherrers grunnlag for interesse og valg av UHPC, som et brokonstruksjonsmateriale, materialets høye styrke – spesielt strekkfastheten, reduksjon av armering, bestandighet – spesielt den lave permeabiliteten, og de selvkomprimerende egenskapene.

Byggherrer benytter UHPC for å koble sammen prefabrikkerte broelementer på byggeplass, og for rehabiliteringsarbeider grunnet de nevnte fordelene. En annen fordel er også at UHPC oppnår god heft med eksisterende betong. Kostnader er da blitt holdt lave siden mengde UHPC som benyttes for disse operasjonene er lav.

UHPC har også blitt brukt til å prefabrikke bjelker, eller andre bæresystemselementer, men bare på noen få demonstrasjonsprosjekter. Grunnet høye materialkostnader, per dags dato, har ikke UHPC blitt benyttet som bæresystem foruten disse demonstrasjonsprosjektene.

Dura Technology

Dura Technology i Malaysia ble også kontaktet for å avdekke hvorfor de benytter UHPC som et brokonstruksjonsmateriale. Dura Technology har produsert over 70 broer i UHPC i Malaysia [3, s. 15].

I henhold til Dura Technology gjør UHPC det mulig å lage bjelker eller elementer med et lenger spenn enn tidligere og med et mindre tverrsnitt. Det er ikke behov for søyler på brokonstruksjoner opp til 100 m som for eksempel brokonstruksjoner over elver. Konstruksjonene blir mer bestandige, og gjør at superkonstruksjoner veier mindre og blir slankere, noe som også gjør fundamentene mindre, som kan gi muligheter til økonomiske besparelser. UHPC gir et lavere CO₂-avtrykk som støtter bærekraftige konstruksjoner og det gir en kortere byggetid.

7.3.2 Tidligere bruk av UHPC i Nord-Amerika

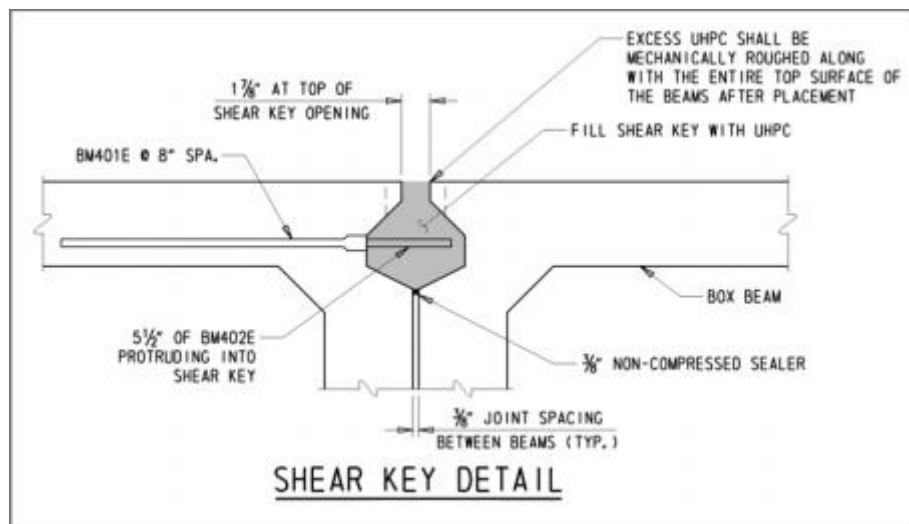
Dette kapitlet presenterer publikasjonen «Properties and Behavior of UHPC-Class Materials» gitt ut av FHWA (Federal Highway Administration) og omhandler hvordan og hvorfor UHPC har blitt benyttet ved forskjellige tilfeller i Nord-Amerika.

Resultatet som er presentert her er avdekket etter dialog med FHWA for å belyse hvordan og hvorfor UHPC har blitt benyttet i brokonstruksjoner. Grunnlaget var å diskutere dette opp mot bransjens mening om UHPC.

Koblingsmateriale og belegg

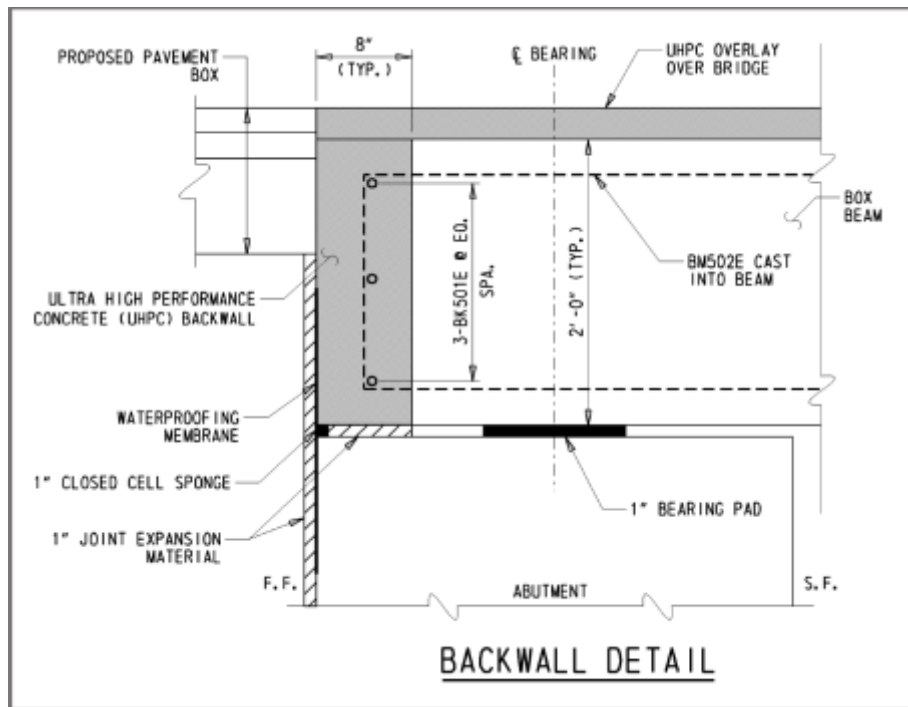
Den mest vanlige UHPC-bruken i brokonstruksjoner i Nord-Amerika er i koblinger mellom andre betongelementer [15, s. 2]. En brokonstruksjon i USA, Delaware, ble i 2017 byttet ut med prefabrikkerte elementer som var koblet sammen med UHPC, og belagt med et UHPC-dekke. Grunnlaget for utbytingen var blant annet mye korrosjon [16, s. .1]. UHPC ble valgt som konstruksjonsmateriale fordi det har høy styrke, rask herdetid, lav- og ikke-kontinuerlig porestruktur, og god bestandighet, noe som gjør den til et godt egnet materiale som kobling. Ved UHPC som belegg beskyttes også alle underliggende konstruksjonsdeler for vanninntrengning, som hindrer klorider i å trengre inn [16, s. .2].

Figur 7.5 viser et tverrsnitt av UHPC som koblingsmaterialet mellom de prefabrikkerte betongelementene (boksbejelker) [16, s. .3].



Figur 7.5. Tverrsnitt av koblingene mellom elementene for konstruksjonen i Delaware [16, s. .3].

UHPC ble også benyttet som et koblingsmateriale i endene av de prefabrikkerte betongelementene, som vist i figur 7.6, for å beskytte elementene mot ytre inntrengninger [16, s.3].



Figur 7.6. UHPC som koblingsmateriale i endene av Delaware broen [16, s.3].

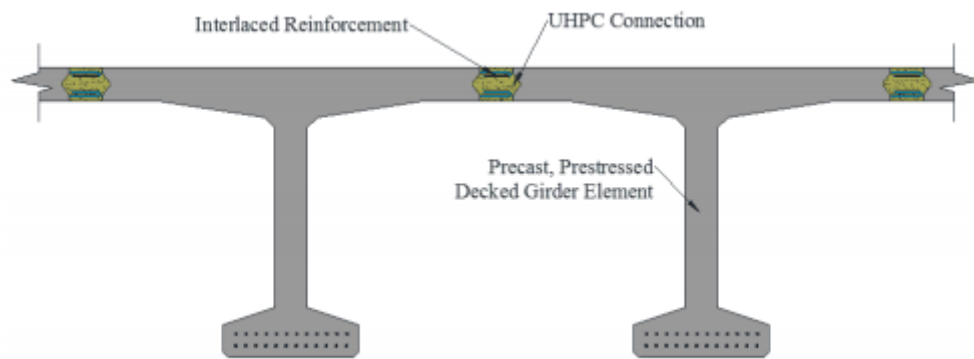
Figur 7.7 viser et bilde av brokonstruksjonen før UHPC blir støpt inn [16, s.4].



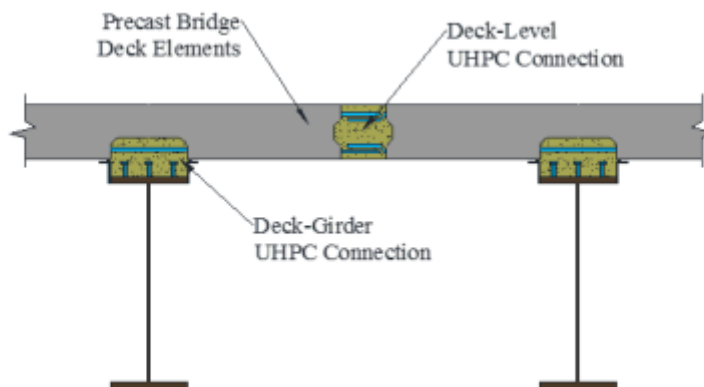
Figur 7.7. Den faktiske brokonstruksjonen i Delaware i Nord-Amerika [16, s.4].

Bruk av UHPC som belegg, eller som brodekke, gav mindre materialbruk sammenlignet med et fullt plasstøpt betongdekke [16, s .3]. Entreprenøren og byggherren som sto for brokonstruksjonen i Delaware hadde ingen erfaring med UHPC, og valgte derfor å utføre tester utenfor byggeplassen. Testene som ble utført var spesielt med tanke på UHPC som belegg eller brodekke. Det ble utført en test uten herdetiltak, noe som resulterte i at UHPC-dekket begynte å sprekke opp etter 15 til 30 minutter. Dette viste at herdetiltak var nødvendig for å ivareta fuktigheten i blandingen [16, s .4]. Brokonstruksjonen ble 1/3 dyrere enn tradisjonell metode, men brukte også bare 1/3 av byggetiden samt at det forventes at brokonstruksjonen har minst en levetid på 100 år, med lite behov for vedlikehold. Det antas også at denne kostnadsforskjellen reduseres så fort standarder og spesifikasjoner blir utviklet [16, s .7]. I 2012 ble over 40 brokonstruksjoner i Nord-Amerika inspirert i Ontario, Canada Iowa og New York, der de fastslo at UHPC som et koblingsmateriale presterte bra [11, s. 2].

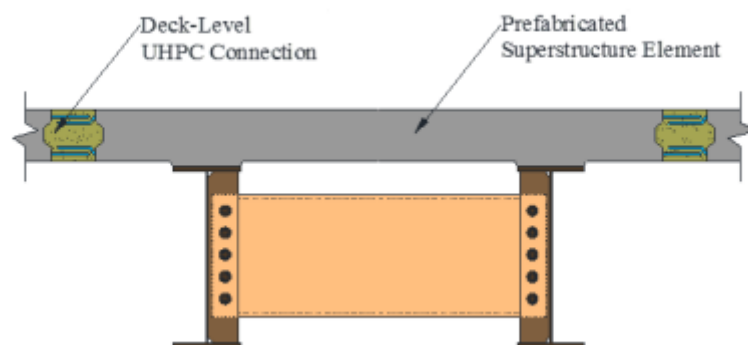
Figur 7.8, 7.9 og 7.10 illustrerer noen av de vanlige metodene å koble sammen broelementer på med UHPC [15, s. 3].



Figur 7.8. UHPC-kobling mellom prefabrikkerte dekke-bjelke-elementer [15, s. 4].

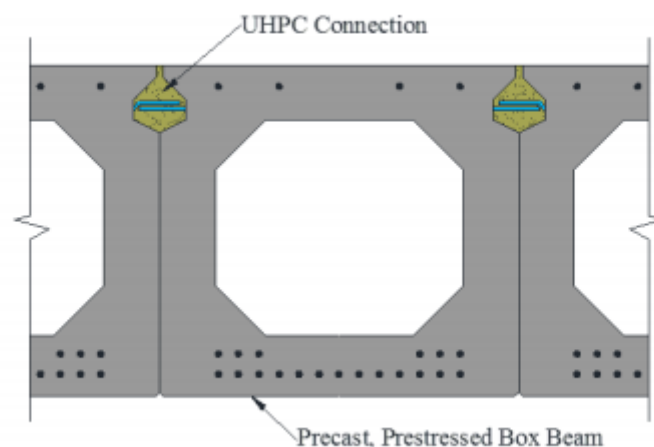


Figur 7.9. UHPC-kobling mellom prefabrikkerte brodekkeelementer og støttebjelker [15, s. 4].



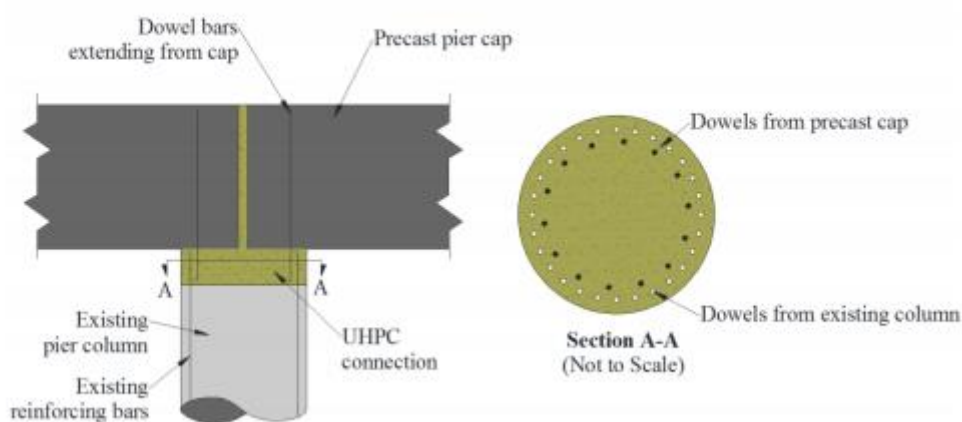
Figur 7.10. UHPC-kobling mellom større konstruksjonselementer [15, s. 4].

Figur 7.11 viser hvordan UHPC kan benyttes til å koble sammen prefabrikkerte boksbjelker. Metoden er tidligere blitt utført på en brokonstruksjon i Ohio, Nord-Amerika. Metoden eliminerer behovet for blant annet overflatebelegg eller et dekke over boksbjelkene. Koblingene overfører også skjærkrefter, momenter, aksiale strekk- og trykkrefter gjennom koblingene. Metoden forenkler systemet for design og konstruksjon [15, s. 3].



Figur 7.11. UHPC kobling mellom prefabrikkerte boksbjelker [15, s. 5].

Figur 7.12 viser UHPC som kobling mellom brospøyer og tverrbærer/mellomstøtter. Fordelene ved bruk av UHPC i denne sammenhengen er at behovet for armeringsjern samt diameteren på dem, mellom søylen og dekket, reduseres betraktelig. Bruken av UHPC forenkler koblingsdetaljene, og hvis det er ønskelig å benytte prefabriserte elementer uten å bruke UHPC gir dette store utfordringer. Metoden er blant annet benyttet på et vegprosjekt med bruk av prefabriserte dekke-elementer og reduserte koblingslengden fra over 1 m, for tradisjonell metode, til 0,305 m. Det reduserte også armeringsbehovet i koblingene [15, s. 3 - 4].

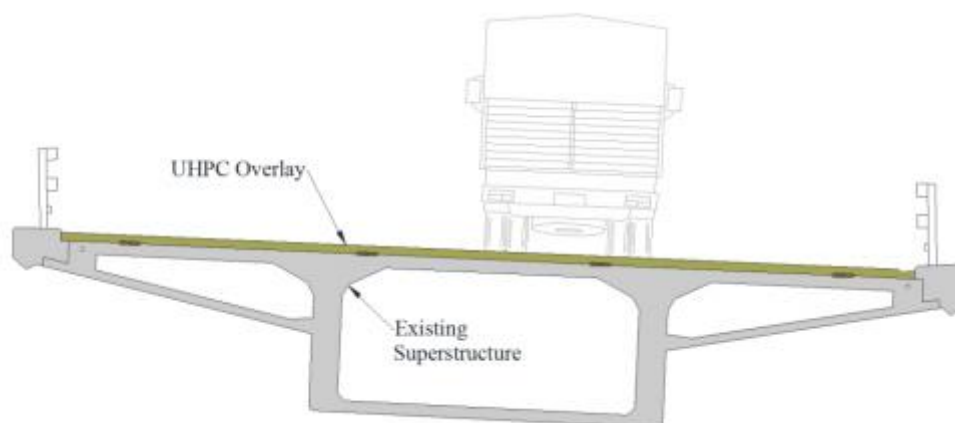


Figur 7.12. UHPC-kobling mellom eksisterende brospøyle og ny tverrbærer/mellomstøtte [15, s. 5].

Rehabilitering

I henhold til FHWA bruker byggherrer i Nord-Amerika mye av budsjettet hvert år for å rehabilitere brokonstruksjoner. Brodekker virker å være den konstruksjonsdelen som oftest må rehabiliteres [15, s. 5]. Hovedårsakene til at brodekker må rehabiliteres er en blanding av at de blir utsatt for store ytre laster fra kjøretøy, fryse- og tinedegradering, oppsprekking, og armeringskorrosjon [17, s. 1].

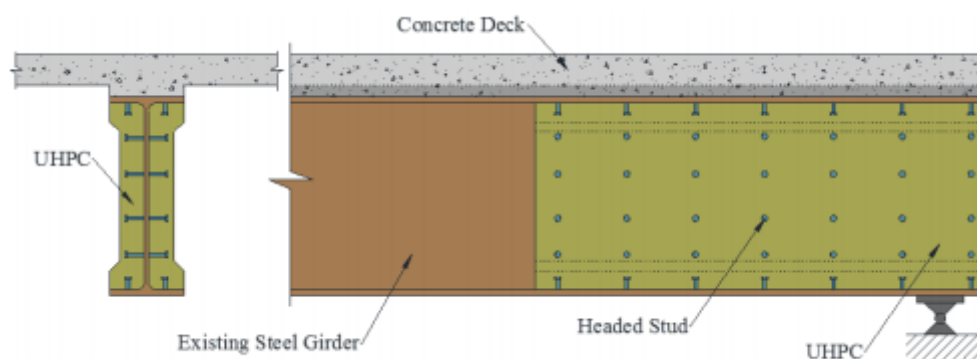
Flere rehabiliteringsmetoder er blitt benyttet i Nord-Amerika med UHPC, men den metoden som kommer mest frem er ved å støpe et UHPC-belegg som brodekke. Som et belegg på brodekker bidrar det til både økning i styrke og beskyttelse for ytre inntrenginger. Metoden er illustrert i figur 7.13 [15, s. 5 - 6].



Figur 7.13. Rehabilitering med UHPC som et belegg over bæreelementene [15, s. 7].

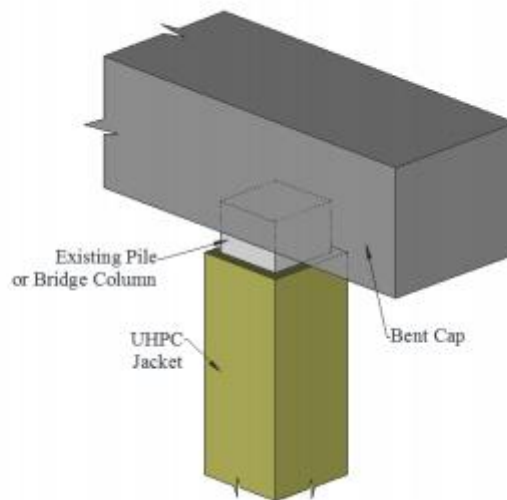
Metoden ved å rehabilitere et brodekke med UHPC som et belegg ble først benyttet i USA i 2016. Brokonstruksjonen var fra 1960 og hadde lav gjennomsnittlig trafikkgjennomgang, men hadde en del tyngre kjøretøy som benyttet brokonstruksjonen. Seks måneder etter rehabiliteringen utførte FHWA en studie for å vurdere heften mellom UHPC og det underliggende betongdekket. Brodekke ble overflatebehandlet før UHPC ble støpt på dekket. En direkte strekk- og dytt-test ble utført for å måle heften mellom materialene og avdekket at det var god heft mellom belegget og dekket [15, s. 6].

En annen metode er også blitt studert i Nord-Amerika der UHPC blir benyttet ved rehabilitering av stålbjelker. Korrosjonen blir fjernet, og bjelken blir forskalt for så å bli fylt igjen med UHPC, som vist i figur 7.14. Eksperiment-studier viser at reparasjoner av endene på bjelkene med denne metoden ivaretar eller oppnår en større kapasitet enn før [15, s. 6].



Figur 7.14. Rehabilitering av stålbjelker med UHPC [15, s. 7].

Plasstøpt UHPC har også blitt identifisert som en løsning for å oppgradere styrken og duktiliteten til elementer som søyler ved å støpe på et UHPC-lag, som vist i figur 7.15 [15, s. 7].

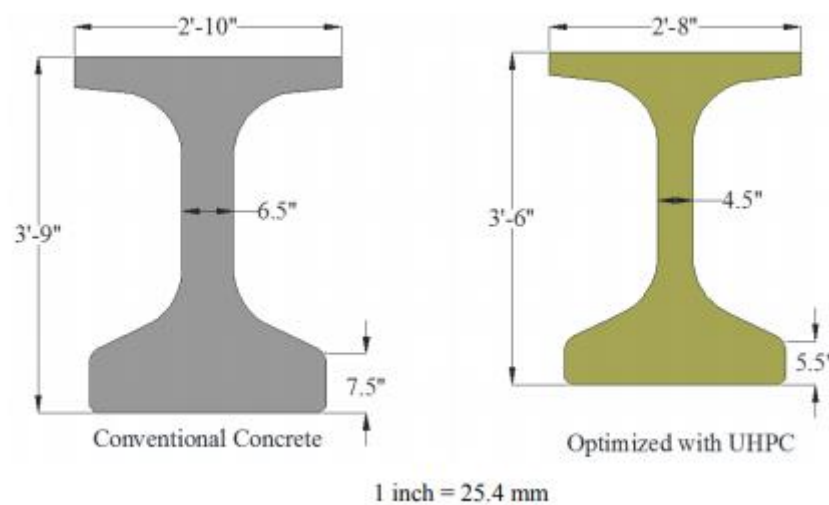


Figur 7.15. Bruk av UHPC på eksisterende søyler [15, s. 8].

UHPC-broelementer

I alle tilfeller i Nord-Amerika, der UHPC sto for 100 % av brokonstruksjonselementer, var UHPC-elementene prefabrikkerte [15, s. 8].

Mars Hill Bridge, en brokonstruksjon i Nord-Amerika, var opprinnelig designet for å bygges med ordinær prefabrikkert betong. Opprinnelig skulle det vært en tre-spenns bro med to tverrbærere/mellomstøtter, men ved å benytte UHPC ble det ett enkelt spenn på 33,5 m. Det originale tverrsnittet ble modifisert og optimalisert som følge av de gode egenskapene til UHPC. UHPC-bjelkene hadde 25 % mindre vekt sammenlignet med de originale. Figur 7.16 viser betongtverrsnittet og UHPC-tverrsnittet [15, s. 8].



Figur 7.16. Sammenligning av tverrsnittet til en ordinær betongbjelke og UHPC-bjelke [15, s. 9].

8 Diskusjon

I dette kapittelet blir resultater avdekket gjennom litteratursøk, intervju med den norske bransjen og dialogen med utenlandske aktører om bruk av UHPC, diskutert i lys av teori og hverandre. Kapitlene som presenteres er basert på underspørsmålene som skal besvare forskerspørsmålene.

8.1 UHPC-materialer og materialegenskaper

Artikler og rapporter, avdekket gjennom bakgrunnsteori og resultat, viser til materialbruk og i noen tilfeller tilhørende materialegenskaper for UHPC. Blant dette er det også avdekket hvordan endringer i materialer påvirker UHPC-produkter. I dette kapittelet blir informasjon fra bakgrunnsteori og resultat som omhandler materialer og materialegenskaper diskutert.

8.1.1 Materialer

Materialtilgjengelighet virker ikke å være begrenset geografisk, da flere land over hele verden har produsert og benyttet UHPC. Det kan derfor virke som at materialene som er nødvendige for å produsere UHPC enten er tilgjengelig i Norge, eller kan importeres uten store kostnader. Det antas også at materialene som benyttes til UHPC ikke er ukjent for industrien i Norge. Grunnlag for antagelsen er at materialer ble presentert i introduksjon til bransjen for intervjuene som ble utført, og det ble ikke stilt spørsmål eller tvil til materialene.

I teorikapittelet *3.2 Materialinnhold* og resultatkapittelet *7.1 Materialer, egenskaper og sammensetninger* er det presentert materialer som inngår generelt i UHPC, og materialsammensetninger med andre materialer og proporsjoner. Det er blitt avdekket at produksjonen av fiberarmering, sement og superplastiserende tilsetningsstoffer er det som er miljøkonsekvensen for UHPC. Miljøkonsekvensen kan dermed påvirkes eller reduseres ved å erstatte eller redusere mengdene til disse stoffene, som nevnt i teorien. Industrielle bi-produkter som mikrosilika, slagg og RHA (risaske), er blitt avdekket å kunne delvis erstatte sement i UHPC på bakgrunn av reduserte kostnader. Denne kostnadsbesparelsen vil da også kunne redusere miljøpåvirkningene til UHPC. Hvor mye dette påvirker kostnader og miljøet er usikkert, men kan antas at større inngrep, uten å påvirke materialegenskapene for mye, kan gi store gevinster. Det er derfor viktig at slike scenarier blir vurdert og sammenlignet med alternative metoder for å kunne vurdere om UHPC, med modifiserte og optimaliserte materialmengder, kan gi gevinst med tanke på miljø og kostnader. Det er også viktig å inkludere muligheter som lenger levetid, mindre vedlikehold og reparasjonsarbeider ved vurdering av UHPC opp mot alternative materialer, gitt at disse mulighetene fortsatt er ivaretatt etter materialendringer. Bransjen, avdekket gjennom intervju, påpekte blant annet kostnader og miljøkonsekvenser for UHPC. Det virker sannsynlig at det kan produseres UHPC som er miljø- og kostnadsvennlige sammenlignet med alternative produkter, hvis egenskapene til UHPC blir ivaretatt.

Ved bruk av tilslag er det rapportert i teorikapittelet at partikkelstørrelse er viktig for UHPC. FHWA har anbefalt en maks partikkelstørrelse på 0,8 mm i diameter. FHWA har også anbefalt et sand-til-vann-forhold på 1,4. Det antas at dette er en viktig del av et UHPC-produkt for å oppnå en tett pakket matrise, som igjen anses å være viktig for de fordelaktige materialegenskapene som høy trykkfasthet og god bestandighet. Det er også rapportert at andre typer tilslag fortsatt ivaretar UHPC sine egenskaper. Selv om kornstørrelsen på tilslaget til UHPC er viktig kan det uansett være noen begrensninger ved valg av tilslag. Det er avdekket tilfelle hvor resirkulert glass ble benyttet, som reduserte trykkfastheten, bøyestyrken og bruddenergien med 15 %. Det er usikkert hvor mye

resirkulert glass som ble benyttet som erstatning, eller om det i tillegg ble benyttet andre materialer, men det kan uansett virke som at valg av materialer, inkludert tilslag, er viktig for et sementbasert produkt. Grunnlag for å benytte andre typer tilslag, eller materialer generelt, virker å være for å redusere kostnader.

Materialvalg virker å være viktig for å oppnå et UHPC-produkt som tiltenkt, hvor det også er mulig å påvirke kostnaden og miljøpåvirkningen til UHPC ved å endre på materialer. Valg av materialer kan både påvirke og ikke-påvirke UHPC sine egenskaper. Det kan derfor antas at hvis egenskapene reduseres ved valg av materialer, økes også besparelsene. Grunnlaget for antagelsen er at materialendringene virker å være utført med hensikt om å redusere de dyre materialene. Det kan diskuteres at UHPC sine egenskaper kan reduseres noe, der det tillates for dette. Det kan alltid være interessant å vurdere materialet med reduserte egenskaper målt opp mot kostnader og miljøpåvirkninger, og da avgjøre om materialet fortsatt ivaretar andre egenskaper som bestandighet, som kan være mer aktuelt for noen bruksområder. Dette kan for eksempel være UHPC som en funksjon der høy trykkfasthet ikke er nødvendig. Det kan igjen antas at når de mekaniske egenskapene påvirkes, så påvirkes også andre typer egenskaper. Vurderinger av dette er derimot ikke avdekket, men skal ikke avkreftes ved valg av materialer. Muligheter til å påvirke UHPC sine egenskaper i henhold til tiltenkt funksjon, og på bakgrunn av miljø- og kostnadsbesparelser, kan bidra til at norske brokonstruksjoner, med riktig bruk av UHPC, oppnår bedre bestandighet og reduserte materialmengder.

8.1.2 Materialsammensetninger og egenskaper

I resultatkapittel 7.1 *Materialer, egenskaper og sammensetninger* er det oppgitt flere UHPC-blandinger med varierende materialer og proporsjoner. DUCTAL er det mest brukte UHPC-produktet i Nord-Amerika, og inneholder materialene sement, sand, mikrosilika, kvarts, superplastiserende- og akselererende-tilsetningsstoffer, stålfiber og vann, som presentert i tabell 7.1. I Nord-Amerika er UHPC mest benyttet som et koblingsmateriale mellom prefabrikkerte elementer, og antas derfor at DUCTAL er en UHPC-resept som er mest egnet for dette bruksområdet. UHPC som et koblingsmateriale anses å være aktuelt for norsk brobygging for å optimalisere prefabrikkerte broløsninger. Bransjen påpekte blant annet svakheter med prefabrikkerte brokonstruksjoner uten lagerløsninger, og at UHPC kan benyttes for å styrke disse løsningene i norske brokonstruksjoner. Tidligere bruk av UHPC i Nord-Amerika viser til kombinasjon av UHPC og prefabrikkerte elementer. Denne metoden virker å være robust, langsiktig, og reduserer byggetiden.

Tabell 7.2 viser en materialsammensetning av Teichmann og Schmidt, der basalt og silika-pulver er inkludert, men mikrosilika er ekskludert. Tabellene 7.3 og 7.4 viser til gjentakende bruk av mikrosilika, sand, superplastiserende tilsetningsstoff, fiber og sement. Tabell 7.3 viser derimot til silika-pulver i tillegg til de nevnte materialene. Det er ikke avdekket tilhørende materialegenskaper til disse UHPC-reseptene, så derfor er det heller ikke avdekket hvordan endringer i materialene påvirker materialegenskapene for disse blandingene. Materialsammensetningene som gitt i tabellene definerer uansett hvilke materialer som er gjentakende i UHPC, og hvilke muligheter som finnes ved bruk av andre eventuelle materialer. Disse materialsammensetningene viser til variasjoner i mengder av de forskjellige materialene, men sement virker å være en av de største mengdene. Som diskutert tidligere er det mulig å erstatte noe av sementen med andre materialer, som også antas å kunne være tilgjengelige også i Norge.

Fiberarmeringen gjør UHPC duktilt, noe som er viktig for å unngå sprøe brudd, og det bidrar til økning av de mekaniske egenskapene. Det antas at UHPC-blandingen blir mer vanskelig å bearbeide dersom det er for mye fiber i blandingen. Ved å øke mengde fiberarmering i UHPC-blandingen vises det i tabell 7.5 og figur 7.2 at trykkfastheten øker. I tabell 7.5 er det også presentert endringer i lengdene til fiberne, men i henhold til tabellen påvirker ikke dette trykkfastheten til produktet. Det kan tenkes at lange fibre ikke oppnår en like stor spredning som korte, da antall korte fibre vil være mye større enn antall lange fibre. Fiberne hadde en konstant diameter, og ble kun endret i lengde, og ved samme volum er det sannsynlig at antall fibre reduseres med økning i lengde. Strekkfastheten blir også påvirket av fibermengde i større grad enn for trykkfastheten. Tabell 7.6 viser at strekkfastheten mer enn doubles fra 1 % mengde fiber til 6 % mengde fiberinnhold. Lengden på fiberne påvirker strekkfastheten til UHPC i negativ retning, der den reduseres ved økning av lengdene. Det kan tyde på, som for trykkfastheten, at spredningen blir for stor slik at fiberarmeringens tiltenkte funksjon forsvinner. Den tiltenkte funksjonen antas å være at ved jevn spredning samarbeider fiberne slik at UHPC-produktet styrkes. Bøystyrken påvirkes også i høy grad av mengde fiberarmering. I figur 7.1 virker det å være dobbelt så stor kapasitet for bøystyrken med et fiberinnhold på 2,5 % sammenlignet med fiberinnhold på 0 %. Økning av fibermengde i UHPC viser til økning av trykkfasthet, strekkfasthet og bøystyrke til produktet, men virker å være størst for strekkfasthet og bøystyrken. Fiberarmering kan dermed anses å være et nødvendig materiale i UHPC, der valg av lengde og mengde fiberarmering er viktig, samt at UHPC blir mer duktilt. Det antas at mengde fiberarmering i UHPC er noe begrenset og heller ikke nødvendig grunnet kostnader og tiltenkt funksjon til produktet. Det kan heller tenkes at mengde fiberarmering legges til grunn for tiltenkt funksjon, som at ved rehabilitering eller kobling kan det være mer aktuelt med større mengder, mens for elementer som også inneholder bærende armering som bjelker, ikke har behov store mengder fiberarmering. Det er uansett viktig å vite hvilken og hvor stor rolle fiberarmeringen har i UHPC. Det er usikkert om fiberarmering må importeres eller om det er lett tilgjengelig i Norge. Det antas uansett at å importere materialer som fiberarmering er på lik linje som import av andre materialer, med at det er tilgjengelig med konkurransedyktige priser.

Materialer og sammensetninger spiller en stor rolle for egenskapene til UHPC. Figur 7.1, figur 7.2 og tabell 7.9 viser til endringer i trykkfasthet og bøystyrke basert på materialvalg som er presentert i tabell 7.8. Endringene som er gitt i tabell 7.8 er av hensyn til å redusere sementinnholdet i UHPC, noe som påvirker trykkfastheten og bøystyrken i henhold til sementmengde. Ved denne testen reduseres altså trykkfastheten og bøystyrken i samhold med mindre innhold av sement. Som gitt i teorien, så skal det være mulig å erstatte sement med andre sementholdige komponenter som slagg eller flyveaske uten at dette påvirker styrken til UHPC-produktet. Mikrosilika blir i tillegg påpekt som en viktig del av UHPC, og kan antas at ved å benytte mikrosilika i tillegg til de andre materialene som erstatning til sement, kunne resultatene blitt bedre ved at trykkfastheten og bøystyrken ville hatt en lavere reduksjon. Disse sementholdige komponentene skal også kunne bidra til en økonomisk- og miljøbesparelse ved å erstatte noe av sementen i UHPC-blandingen, uten at egenskapene påvirkes for mye. Det er derimot usikkert hvor mye, eller om noen av materialene påvirker mer enn andre materialer.

Det virker å være mulig å redusere de mer kostbare materialene i UHPC, og samtidig kunne oppnå tiltenkt funksjon. UHPC virker å være et materiale som kan påvirkes basert på hva som er nødvendig for dens tiltenkte funksjon. Videre forskning og testing av endringer i egenskaper basert på materialinnhold er derfor viktig for å avdekke om produktet kan optimaliseres med tanke på ytelse,

kostnader og miljøpåvirkninger. UHPC kan anses å være et dyrt produkt å produsere, men å benytte materialet kan derimot anses å være konkurransedyktig både for miljø og økonomi, grunnet materialbesparelser og bedre bestandighet sammenlignet med alternative løsninger. Det er derfor viktig å vurdere helheten av et materiale, og ikke fastslå en kostnadsvurdering ved kun produksjon.

Materialsammensetningene og materialene som benyttes i UHPC anses å være kjent for den norske bro/betong-industrien, og blir ikke sett på som et problem ved å eventuelt benytte produktet i Norge. Tilgjengeligheten på både resepter og materialer virker også å være stor for aktører. Det kan derimot antas at mange resepter ikke er tilgjengelig, men at det allikevel er mye forskning som er tilgjengelig for grunnlag til resepter.

Det kan vurderes at det burde være flere antall artikler og forsøk for å kunne fastslå UHPC sine egenskaper. Det er derimot tatt i betraktning generelle materialegenskaper, og egenskaper avhengig av materialinnhold som et utgangspunkt, og testene som er avdekket gjennom andre artikler kan være unike og viktige for å vurdere UHPC som et konstruksjonsmateriale.

8.2 Bransjens mening om UHPC

11 personer fra den norske betong- og brobransjen ble intervjuet om deres mening ved bruk av UHPC i brobygging. Av de 11 respondentene var det ni som besvarte spørsmålene. Besvarelsene fra intervjuene er presentert i kapittel 7.2 *Intervju av betong- og brobransjen*.

Figur 7.3 i kapittel 7.2 *Intervju av betong- og brobransjen* viser respondentenes roller i dag, og figur 7.4 viser respondentenes erfaring. Begge figurene viser mer enn 9 svar, og grunnlaget for dette er at flere har mer enn en rolle industrien i dag, og flere har også erfaring i mer enn en av kategoriene. Besvarelsene dekker mye av den norske betong- og brobransjen, og antas å være representativt ved en konklusjon for hva bransjen mener om materialet. Det var ønskelig å intervju flere respondenter, spesielt i den bransjen der det er færrest respondenter som for betongleverandører, men grunnet oppgavens tidsbegrensning ble det besluttet at de ni som besvarte var nok for å kunne besvare oppgaven.

Bransjen stilte tvil til varmeutvikling, riss, overdekningsreduksjon ned til 19 mm og bruk av stålfiber på grunn av rustproblematikk ved bruk av UHPC. Det er ikke avdekket informasjon knyttet til rustproblemer ved bruk av stålfiber i UHPC. Det er derimot nevnt i teorien er stålfiber har blitt benyttet ved flere anledninger med forskjellige formål, hvor rust ikke har vært definert som et problem. Bruk av stålfiber er heller blitt avdekket som en fordel siden UHPC er bestandig og motstandsdyktig mot ytre inntrengninger. Det kan antas at stålfibere som er helt i overflaten av UHPC-elementet eller konstruksjonsdelen kan ruste, men at disse ikke er kontinuerlige og ikke vil videreføre rust inn i elementene. Ved eventuelle tilfeller der overdekningen blir satt ned helt til 19 mm, som nevnt i teorien, kan det antas at rust på overflaten har muligheter for å trenge inn til bærende armering. Dette er derimot en antagelse, og bør eventuelt testes ut.

Potensielle problemer rundt varmeutvikling, som bransjen påpekte, er derimot tilfelle siden det produseres mye varme i UHPC. Tiltak er dermed nødvendig som gitt i teorikapittelet og resultatkapittelet. Det er blitt rapportert at i starten av en brokonstruksjon i Delaware, Nord-Amerika, ble det utført tester av blant annet et UHPC-brodekke, hvor de avdekket at uten herdetiltak sprakk dekket opp. Det er derfor viktig å utføre tiltak som å pakke inn konstruksjonselementet for å unngå tap av vann. Uten tiltak anses det at rissutvikling eller andre problemer kan oppstå som kan redusere produktets evne. Det kan også antas at håndtering av UHPC er mer komplisert enn presentert i denne oppgaven.

En respondent påpekte at reduksjon av tverrsnitt kan føre til reduksjon i betongmengder, noe som gir gevinst ved egenvekt og mengde betong. I henhold til intervjuene er dette noe som bransjen allerede jobber mot, hvor UHPC kan være en mulig løsning. I bakgrunnsteorien presiseres det at ved valg av UHPC som konstruksjonsmateriale, var reduksjon av tverrsnitt og materialbesparelser blant de viktige faktorene for valg av UHPC som konstruksjonsmateriale. Det antas at muligheter for besparelser av materialer og kostnader er viktig for at et nytt materiale skal være aktuelt for brokonstruksjoner. Det er også viktig å vurdere miljøpåvirkninger og at det både må være muligheter ved miljø- og kostnadsgevinster. UHPC anses å være et materiale som kan bidra til disse gevinstene, ved for eksempel at reduserte tverrsnitt og materialbesparelser reduserer betong- og armeringsmengder.

Bransjen anså bruk av UHPC i Norge som interessant, men at det må introduseres forsiktig for å oppnå erfaring med bruk av materialet. Det ble blant annet påpekt at fiberarmering ikke benyttes

som konstruktiv armering i norske brokonstruksjoner. Det er derimot presentert i teorikapittel 3.4 *Brokonstruksjoner og byggemetoder*, at UHPC har blitt benyttet til blant annet bjelker i form av bæresystem opp til gjentatte ganger, ofte i kombinasjon med annen konstruktiv armering. Det er ikke avdekket problemer rundt bruk av fiberarmering i bærende elementer, men kan heller ikke utelukke eventuelle komplikasjoner med dette. Det er heller ikke avdekket om norske regelverk utelukker bruk av fiberarmering i brokonstruksjoner i Norge.

I henhold til bransjen har bruk av UHPC i rehabilitering, og i områder som er utsatt for store laster eller ytre miljø som i koblinger, et større potensiale. I henhold til teorien er UHPC blant annet blitt benyttet som et koblingsmateriale mellom prefabrikkerte broelementer for å bedre bestandigheten. Ved koblingsmetoden økes motstanden mot ytre inntrengninger samt trykkfastheten i koblingene. Metoden blir sett på som en robust og langsiktig løsning, og er i Nord-Amerika blitt benyttet minst 275 ganger. Koblingsmetoden er en måte å kombinere prefabrikkerte betongelementer med UHPC for å sikre såkalte svake punkter i konstruksjonen som nevnt i teorien. Det er usikkert om dette gjelder korte broer eller andre typer broløsninger, men det kunne uansett vært interessant å vurdere koblingsmetoden for brokonstruksjoner i Norge ved å kombinere UHPC med prefabrikkerte elementer. Denne løsningen virker å være effektiv og sikker, og kan gi muligheter for norsk brobygging som et alternativ til noen broløsninger. Som presentert i kapittel 7.3.2 *Tidligere bruk av UHPC i Nord-Amerika*, kan UHPC også benyttes som kobling mellom søyler og mellomstøtter/tverrbærere. Dette kunne blant annet bidratt med å fremme prefabrikkerte løsninger over flere spenn for norske brokonstruksjoner. Det kan også antas at vedlikehold og eventuelle fremtidige reparasjoner av disse koblingsdetaljene vil kunne bli redusert betraktelig. Som et rehabiliteringsmateriale er UHPC også blitt benyttet i verdensdeler som Nord-Amerika, men ved færre tilfeller sammenlignet med kobling. Allikevel rapporteres det i teorien at lenger levetid og mindre vedlikehold er faktorer ved UHPC som et rehabiliteringsmateriale.

Ved vurdering av UHPC som bjelker eller bæresystem anså bransjen at slankere bjelker, reduksjon av overdekning, mindre tverrsnitt og lenger spenn var spennende muligheter, men at det er viktig å vurdere UHPC i hele prosjekteringsfasen for å unngå forandringer i forutsetningene. Bransjen så derimot problemer med fiberarmering i bjelker, oppnåelse av duktilitet og konstruksjonssikkerhet ved bruk av UHPC, samt at innblandingen av fiber var et usikkerhetsmoment. UHPC med fiberarmering er derimot avdekket å være et duktilt materiale. Duktiliteten til UHPC-produktet kan påvirkes ved å endre på enten mengde eller lengde fiberarmering. Det er ikke avdekket om fiberarmering, som nevnt tidligere, kan gi rust inn i konstruksjonselementet, men det antas at dette ikke er et problem på grunnlag av at det allerede er blitt benyttet flere ganger. Innblanding av fiber og spredning kan antas å være et usikkerhetsmoment, men at med gode prosedyrer anses det som håndterbart. Dette er uansett noe som bør testes ut og er en viktig faktor som må ivaretas ved eventuell bruk av UHPC.

Rehabilitering var et bruksområde for UHPC som respondentene gav et positivt uttrykk for. Det er blitt rapportert god heft mellom UHPC og betong, så ved rehabilitering virker UHPC å være et godt alternativ. UHPC som belegg ble vurdert av noen å være interessant, mens andre i bransjen ikke så for seg UHPC i dette bruksområdet, i hvert fall ikke hvis det skulle erstatte asfalt. Både rehabilitering og belegg er tidligere blitt rapportert i andre land, men i liten grad sammenlignet med kobling. Egenskapene til UHPC tyder derimot på at det er veldig aktuelt for begge bruksområdene, og virker også å være aktuelt å kombinere kobling med belegg for å beskytte elementer under brodekket.

Rekkverk i UHPC ble vurdert til å være interessant, gitt at krav overholdes, spesielt med tanke på stivhet. Det kan antas at rekkverket kan bli slankere og samtidig kunne oppfylle samme funksjon som ordinær betong. UHPC i rekkverk er lite omtalt i litteraturen, og bør undersøkes mer for å oppnå en større forståelse av UHPC sine eventuelle fordeler og ulemper for dette bruksområdet.

Som tidligere nevnt, påpekte respondentene flere mulige utfordringer som varmeutvikling, riss, pris og klima ved bruk av UHPC. Bransjen anså også UHPC som et dyrere og mindre miljøvennlig produkt sammenlignet med alternativ betong. Varmeutvikling og riss, som nevnt tidligere, kan være et aktuelt problem, men tyder på at de mulige problematikene er håndterbare. I teorien og i resultatet er det antydning at UHPC er et dyrt alternativ med tanke på kostnader. Det er også gitt i teorien at disse kostnadene kan reduseres ved bruk av andre typer materialer som diskutert tidligere. Det er også viktig å vurdere konstruksjonskostnader inkludert vedlikeholdsarbeider når UHPC sammenlignes med alternative materialer. Som diskutert i kapittel 8.1, så antas det at UHPC er dyrere å produsere, men at bruk av UHPC kan gi besparelser ved reduksjon av materialer og vedlikehold. Norske brokonstruksjoner har muligheten til å bli påvirket av de mulige fordelene som UHPC har. Reduksjon av vedlikehold på både gamle og nye brokonstruksjoner er mulighetene som bør vurderes og undersøkes ved bruk av UHPC som et konstruksjonsmateriale.

Flere utfordringer som støpemetoder, regelverk og manglende testing av materialet i Norge var punkter som ble påpekt av bransjen. Regelverket anses å alltid være en hindring for nye materialer, og UHPC må derfor prøves ut for å oppnå kunnskap til å eventuelt kunne lage et regelverk og retningslinjer rundt bruken av materialet. Ved å teste ut et produkt kan det avdekkes om UHPC kan bidra til norsk brobygging. Det er ikke avdekket direkte prosedyrer eller informasjon som omhandler støpemetoder, men antas at arbeider med fiberarmeringen må håndteres forsiktig og for eksempel ikke påføres ytre vibrasjoner hvor fiberne kan risikere å legge seg på bunnen. Utenom håndteringen av fiberarmeringen antas det at nødvendige prosedyrer til noen grad kan sammenlignes med prosedyrer for andre sementbaserte materialer som ordinær betong. Det antas da at prinsippet er det samme, med modifikasjoner for herdetiltak, og faktorer som kan være avgjørende for UHPC. Ved bruk av UHPC anses det at industrien i Norge allerede har utstyr som er tilstrekkelig for å behandle materialet, siden ordinært betongutstyr skal være tilstrekkelig for å bruke UHPC som gitt i teorien.

En av respondentene mente at bruken av UHPC er blitt benyttet i mer klima-vennlige regioner enn Norge. I Nord-Amerika er det derimot blitt produsert mange brokonstruksjoner med UHPC som gitt i teorien, og flere av disse er bygd i Canada. Det antas at klimaforskjeller mellom Norge og Canada er liten, selv om det ikke er avdekket hvor, geografisk, i Canada konstruksjonene er bygd. Det er uansett ikke avdekket eller spesifisert av andre aktører, at UHPC kun kan benyttes i klimavennlige områder. Det er heller mer sannsynlig at UHPC er et bedre alternativ i mindre klimavennlige områder siden materialet har god bestandighet som motstand mot ytre inntrengninger og påvirkes i liten grad av fryse- og tine-prosesser. Støp av UHPC i kaldere regioner virker heller ikke å være en hindring grunnet den høye varmeutviklingen.

En av respondentene mente at UHPC er som annen betong og kan benyttes til det meste, men at materialet muligens ikke er den beste løsningen for alt. Det er viktig å vurdere materialets mulige bruksområder hvor materialet kan yte best, gjerne i kombinasjon med andre materialer. Et eksempel av dette kan være majoritetsbruken av UHPC i Nord-Amerika, der UHPC blir benyttet i kombinasjon med prefabrickerte betongelementer for å styrke svake punkter på en brokonstruksjon. Slike bruksområder anses også å kunne være en suksess i norsk brobygging.

UHPC kan anses å fortsatt være et nytt materiale, selv om produktet allerede er utprøvd i flere verdensdeler. Betong er uansett et materiale som benyttes til blant annet brobygging i samarbeid med andre materialer som stål. UHPC kan anses å være et godt alternativ for noen løsninger, men kanskje ikke alle. Det antas at UHPC i kombinasjon med ordinær betong kan være en god løsning i de rette bruksområdene som ved kobling mellom prefabrikkerte elementer. Under intervjuene ble det stadig stilt tvil rundt kostnader og miljøpåvirkninger ved UHPC. Teorien og bakgrunnskunnskapen som er avdekket viser ingen sikre svar på om UHPC er dyrere eller mindre miljøvennlig enn alternativ betong, men antyder at metoder med UHPC er dyrere enn alternative løsninger, i hvert fall med UHPC som bærende elementer. Ved en vurdering om UHPC er bedre eller dårligere enn alternative materialer miljø- og kostnadsmessig er det viktig å inkludere levetid og tiltenkt vedlikeholdsbehov sammen med materialbruk og byggeprosess. UHPC kan, som tidligere nevnt, være dyrere å produsere, men andre fordeler med materialet kan påvirke sammenligningen.

Bransjen virker engasjerte til å prøve ut materialet i norsk brobygging, men setter tvil til regelverket og manglende standarder for å kunne benytte materialet. Erfaring og kunnskap utgjør også en hindring, men blir ansett å være i mindre grad siden denne kunnskapen enten kan tilegnes internasjonalt, eller ved å teste ut materialet i mindre skalaer. Materialet møter noe motstand fra bransjen både ved fremtidig og tidligere bruk, men potensialet og muligheten til materialet virker uansett å være interessant for bransjen.

Intervjuspørsmålene og den tilhørende introduksjonen som ble presentert til bransjen kan ha vært noe mangelfull, og det kan hende at den burde vært presentert annerledes. Det var derimot nødvendig at både introduksjonen og spørsmålene ble presentert korte og tydelige for å engasjere deltagelse og utfyllende svar som var av interesse for oppgaven. Intervju over e-post kan ha skapt misforståelser, med begrensede muligheter for dialog mellom intervjuer og respondent. Dette kan anses å være negativt for resultatene produsert gjennom intervjuene, men gjør det også mulig å kunne intervju flere respondenter grunnet tidsbegrensninger. Intervju over e-post gjorde det også mulig å intervju respondenter over hele Norge, uten en geografisk hindring. Det kan også tenkes at mange av respondenter godtok intervjuene på grunnlag at de kunne gjennomføre intervjuet når det selv passet dem.

8.3 Hvordan UHPC kan benyttes

I dette kapittelet diskuteres det hvordan UHPC kan benyttes. Diskusjonen foregår i lys av avdekket informasjon fra blant annet resultat kapitlene 7.2 *Intervju av betong bransjen* og 7.3 *Hvordan UHPC kan benyttes*.

UHPC virker å være et innoverende materiale som kan bidra til muligheter der dagens broløsninger kanskje ikke strekker til. Det som i dag blir vurdert å være utfordringer for brokonstruksjoner, kan muligens være områder der UHPC er en god løsning. I intervjuet av bransjens mening om UHPC ble det blant annet stilt spørsmål om dagens utfordringer med brokonstruksjoner, presentert i kapittel 7.2.1 *Utfordringer med dagens brokonstruksjoner*. Riss – spesielt svinriss på kantdragere, store vedlikeholdsoverflater – spesielt for prefabrikkerte brokonstruksjoner, ytre inntrenginger, stor egenvekt, korte spenn, klimaregnskap og manglende oppnåelse av god bestandighet var punkter som ble vurdert av respondentene å være dagens problemer med brokonstruksjoner. De nevnte at problemene varierer avhengig av broløsning fra prefabrikkerte til plaststøpte brokonstruksjoner i form av store og små konstruksjoner. Uansett så antas det å alltid være et behov for både store og små konstruksjoner, der begge kan bygges på forskjellige måter. Mange av dagens problemer med brokonstruksjoner virker å være mulig å bedre ved bruk av UHPC. Bestandighetsproblemer, lagerløsning, mindre vedlikehold, lange spenn og motstandsdyktig mot ytre inntrengninger er flere fordeler som UHPC kan bidra med. Norske brokonstruksjoner anses å ikke være foruten flere av disse problemene, og anses derfor at UHPC kan være løsningen for noen av problemene, gitt at det blir undersøkt og testet.

Mindre materialmengder og kortere byggetid er også nevnte fordeler med UHPC, og kan påvirke både miljøforhold og økonomiske forhold positivt. Ved å kunne redusere byggetiden på brokonstruksjoner antas det også å være store fordeler for både samfunn, byggherre og entreprenør. For prefabrikkerte brokonstruksjoner er det også nevnt i intervjuet at lagerløsninger er utfordrende. UHPC er gjentatte ganger blitt benyttet som et koblingsmateriale mellom prefabrikkerte elementer og anses å være en rask og sikker metode. Som nevnt i dialogen med FHWA holdes også kostnadene nede ved at bruken av UHPC kun er i små mengder. Til slutt er det vedlikehold som er belyst i intervjuet som et problem med dagens brokonstruksjoner. UHPC er også her antatt å ha et redusert behov for vedlikeholds- og rehabiliteringsarbeider. Det er også flere måter å benytte UHPC som et koblingsmateriale, som presentert i kapittel 7.3.2. De fleste metodene virker å være kobling mellom forskjellige typer bærende elementer, men viser også muligheter ved å koble sammen søyler og tverrbærere eller mellomstøtter på brokonstruksjoner. Det er derfor viktig å vurdere UHPC ved flere anledninger, siden materialet virker å være fleksibelt.

De som allerede har erfaring med UHPC, og velger å benytte det som et konstruksjonsmateriale for brokonstruksjoner, gir tilbakemelding om et produkt som virker å leve opp til forventningene. Det er uansett ikke avdekket tilstandsrapporter eller detaljerte undersøkelser av disse brokonstruksjonene etter flere års drift.

UHPC har tidligere blitt benyttet som kobling, belegg, bæresystem, rehabilitering og rekkverk. Bransjen ser også muligheter ved å benytte UHPC til undervannskonstruksjoner, peler og andre konstruksjonselementer utenfor brobygging hvor overdekningskravet er lavere. Det antas at bruksområdet for UHPC også kan være mulig for andre type konstruksjoner enn brokonstruksjoner. Det kan være at ved å benytte UHPC som et konstruksjonsmateriale der reglene er mindre strenge, fører til mer kjennskap til materialet.

UHPC virker å være et konstruksjonsmateriale med fremtid for brobygging. Det virker i dag å være ønskelig med konstruksjoner som har lang levetid uten å ha større inngrep i form av vedlikehold og reparasjonsarbeider innen tiltenkt levetid. UHPC anses å være en mulig løsning, men grunnet manglende erfaring, kunnskap og regelverk ved bruk av materialet, blir også etterspørselen begrenset. Det kan derimot antas at UHPC har en lys fremtid, avhengig av at materialet testes ut i dag, og at standarder og regelverket ivaretar produktet. Norske aktører bør derfor vurdere om materialet har en mulig fremtid som en alternativ løsning i brobygging, og vurdere hvor materialet kan være fordelaktig.

Flere respondenter så muligheter ved bruk av UHPC i norsk brobygging, men at standarder og godkjenninger måtte være tilrettelagt for å kunne benytte materialet. UHPC som lagerløsning på brokonstruksjoner er i henhold til respondentene en mulighet, særlig siden lager ofte er utsatt for påkjenninger av last og ytre miljø. Reduksjon av materialbruk og byggetid er også andre muligheter som eksisterer ved bruk av UHPC i kombinasjon med prefabrikkerte elementer, noe bransjen vurderte å være spennende. Det påpekes blant dette at materialet må være mer miljøvennlig enn alternativ betong. I henhold til Dura Technology gir UHPC et lavere CO₂-avtrykk. Sammenligningen antas å være med alternativ betong. Standarder virker også å være et hinder for mer hyppig bruk av UHPC i andre land, og vil nok også være en hindring for bruk i Norge. Det antas at uavhengig av standarder og regelverket, så må det være en etterspørsel av materialet.

Ved spørsmål om hva som må til for at UHPC skal kunne tas til bruk i Norge mente bransjen at fordeler og bruksområdet for materialet må være dokumentert, og at det må være konkurransedyktig med hensyn til kostnad og miljø. Regelverket må også muligens endres på, og standarder og retningslinjer må være tilrettelagt. I intervjuet kom det også frem viktigheten av at nye materialer må introduseres der det kan forventes å fungere bra. En mulig løsning ved å vurdere bruken av det i Norge er å kontakte utenlandske aktører som har erfaring og dokumentasjon på hvordan UHPC ble benyttet, og hva slags forbehold og prosedyrer som ble fulgt. Det antas at andre land også er interessert i at flere tester ut materialet for å øke kunnskap og erfaring.

I intervjuene med bransjen ble det avdekket og påpekt av en respondent at UHPC allerede har blitt benyttet i Norge i flere år innen reparasjon av brokonstruksjoner. Utfordringen med UHPC på brokonstruksjoner ble opplyst å være at det sprekker opp på grunn av at materialet er sprøtt. Tilfellene og detaljene for bruken av UHPC i Norge utover det som er nevnt, er ikke avdekket i denne oppgaven. UHPC er derimot avdekket å være et godt tilegnet materiale for rehabilitering av blant annet brodekker. Om tilfellet er slik at UHPC ikke er egnet for denne type bruksområde er det viktig at nødvendig dokumentasjon tilsier dette. Manglende kunnskap eller andre faktorer kan ha vært avgjørende for eventuelle mislykkede forsøk med UHPC, men er vanskelig å anta uten å vite noe mer om hendelsene. Det kan også antas at tilfellet med UHPC i Norge som rehabiliteringsmateriale har vært uten fiberarmering. UHPC uten fiberarmering er rapport å være sprø, men med fiberarmering skal UHPC være et duktilt materiale. Det er uansett viktig å ta med vurderinger hvor UHPC ikke har utmerket seg for å kunne vurdere bruken av materialet. Derfor er det nødvendig med dokumentasjon fra tilfellet hvor UHPC ikke egnet seg til rehabilitering av norske brokonstruksjoner.

Gjennom intervjuene var det formening om at statlige aktører bør engasjere bruk eller forskning av UHPC, mens andre mente at noen må ta initiativet for å benytte materialet. Det antas at bransjen og aktører foruten de statlige også må engasjere bruken av materiale for å skape en etterspørsel, slik som det ble påpekt av en respondent. Det kan også tenkes at for å komme med nye og innovative

løsninger, så er alle ansvarlige i å fremme nye produkter som kan gi bedre resultater. Hvis UHPC kan redusere miljøkonsekvenser, eller økonomiske utgifter ved brobygging, så kan dette påvirke alle fra byggefasen til drift- og vedlikeholdsfasen. Det kan også antas at planleggingsfasen kan bli forenklet hvor UHPC kan bidra til enklere løsninger. Det er derimot usikkert om disse løsningene forenkler planleggings- eller byggefasen. For norsk brobygging kan det uansett ha en stor betydning ved å være innovativ og vurdere nye mulige bærekraftige materialer som UHPC.

Den norske betong- og brobransjen virket interesserte i materialet, både med tanke på muligheter og hindringer ved materialet. Det er viktig at slike materialer blir både utfordret og vurdert for både de positive og negative faktorene som kan være aktuelle ved bruk av materialet. I et tilfelle hvor UHPC blir vurdert som et konstruksjonsmateriale for brokonstruksjoner kan det hende at materialet ikke alltid er det beste valget, men hvis det finnes muligheter der UHPC faktisk kan være bedre egnet enn andre materialer, må det først kunne benyttes uten at andre aktører hindrer dette på noen måter. Som nevnt tidligere er det dermed viktig å ta læring fra andre land som har erfaring med slike materialer for å egne seg kunnskap og kanskje etter hvert kunne vurdere å benytte seg av det.

UHPC som bærende elementer virker ikke å være et alternativ for norsk brobygging grunnet manglende kunnskap, erfaring og store usikkerhetsmomenter ved kostnadsvurderinger. Det er heller ikke avdekket miljøvurderinger for materialet, bortsett fra at det kan redusere materialbehov, og kan derfor anses å være et alternativ som enda ikke er lønnsomt både med tanke på miljø og økonomi. Forskning og kunnskap om materialet kan derimot gjøre det til et attraktivt alternativ i fremtiden. Fordeler som lenger levetid, lenger spenn, slankere konstruksjoner, mer bestandighet, og mindre vedlikehold og reparasjoner av brokonstruksjoner i Norge anses å være fordeler som er verdt å undersøke, samt vurdere. FHWA og Dura oppgir også flere av disse fordelene med UHPC, og det antas at fordelene som lenger spenn og slankere konstruksjoner er spesielt ment for UHPC som bærende elementer.

Metodene som virker mer aktuelle for norsk brobygging i dag er UHPC som et koblingsmateriale og for rehabilitering. Prefabrikkerte brokonstruksjoner kan ha nytte av et koblingsmateriale som er rapportert å være en robust, god og langsiktig løsning. UHPC kan også tenkes å fremme bruken av prefabrikkerte elementer i brokonstruksjoner. Mer kunnskap og informasjon om denne metoden vil kunne opparbeides ved å teste ut metoden i Norge. Kobling og rehabilitering kan anses å ha noen lignende prinsipper, der UHPC må få god heft mot andre overflater, samt kunne overføre krefter for å bidra til konstruksjonens bæring. Rehabiliteringsarbeider kan få mer langsiktige løsninger med UHPC. Det kan tenkes at UHPC som et rehabiliteringsmateriale i norsk brobygging møter på utfordringer ved at dagens løsninger er gode nok. Grunnlag for en slik antagelse er at elementene som blir rehabilitert i dag, vil få en lenger levetid enn andre konstruksjonselementer på den aktuelle brokonstruksjonen, og vil derfor ikke være nødvendig med et materiale som gir enda lenger levetid lokalt på en konstruksjon. Men, det kan også tenkes at UHPC gjøre det mulig å rehabilitere brokonstruksjoner med enklere og mer sikre metoder for å øke levetiden til hele konstruksjonen sammenlignet med alternative løsninger. Tanken er at UHPC som et rehabiliteringsmateriale i norsk brobygging kan gi muligheter til nye løsninger som kan være fordelaktig for noen konstruksjoner, men kan også være unyttig å fremme produktet for et bruksområde som allerede kan ha gode løsninger. UHPC har også blitt rapportert som benyttet til å styrke eksisterende bjelker, ved å påføre det på strekksiden av bjelkene. Dette rapporteres å øke bøyestyrkekapasiteten helt opp til 400 %. Referansetallet for denne prosentøkningen er derimot ukjent. En mulig løsning for bruk av UHPC i

norske brokonstruksjoner kan være ved å styrke allerede eksisterende konstruksjoner som kan ha mistet sin tiltenkte bæreevne. Heft mellom UHPC og ordinær betong er rapportert å være god, noe som gjør at materialene virker å fungere godt sammen.

UHPC som belegg virker å være aktuelt for å beskytte underliggende elementer mot ytre inntrenginger eller påkjenninger. Det er derimot usikkert om dette har vært, eller er et problem med dagens brokonstruksjoner i Norge, og i henhold til intervjuene virket bransjen interessert i metoden, men det anses at dagens løsninger er gode nok og at UHPC ikke nødvendigvis er en bedre løsning. UHPC som rekkverk virker aktuelt i norsk brobygging. Ved å kunne redusere overdekning, hvis regelverket tillater det, anses det at rekkverk kan bli slankere, men allikevel opprettholde sin sikkerhetsfunksjon.

8.3.1 Tidligere bruk av UHPC i Nord-Amerika

Som tidligere nevnt er det avdekket gjennom teorien og resultatet at UHPC som et koblingsmateriale er den mest normale metoden å benytte materialet som i Nord-Amerika. Presentert i kapittel 7.3.1 *Tidligere bruk av UHPC i Nord-Amerika*, var grunnlaget for valget av UHPC som koblingsmateriale og belegg på brokonstruksjon i USA, høy styrke, rask herdetid, lave og ikke-kontinuerlig porestruktur og god bestandighet. Figur 7.5 i kapittel 7.3.2 *Koblingsmateriale og belegg* viser et tverrsnitt av hvordan prinsippet med UHPC som et koblingsmateriale ser ut. De prefabrikkerte elementene er da produsert med hensikt om å koble de sammen med UHPC mellom elementene. I koblingene er det også gjennomgående armering, der det antas at grunnlaget er for å sikre heft, samt overføring av krefter. Det kan også antas at det er andre grunner for armeringen, men at det er de nevnte punktene som er viktigst. Konstruksjonen har en forventet levetid på minst 100 år med lite behov for vedlikehold. Kostnaden med bruk av UHPC som kobling (1/3 dyrere enn alternativ metode) forventes å bli redusert når standarder og spesifikasjoner for UHPC blir utviklet. Bestandighet, raskere byggetid og robuste koblinger er det som anses som positivt med UHPC som er koblingsmateriale mot alternative og tradisjonelle metoder. Nødvendige herdetiltak og høyere kostnader enn alternative løsninger virker derimot negativt, der også usikkerhet om riss etter nødvendige herdetiltak er en faktor. Bransjen i Norge, diskutert i kapittel 8.2.1 og 8.3.1, påpekte blant annet disse faktorene, både positive og negative, i intervjuene. Selv om kostnaden viser seg å være høyere enn alternative løsninger, kan det antas at metoden vil resultere i lenger levetid med mindre behov for vedlikeholds- og reparasjonskostnader i ettertid av byggingen. Det kan også antas at reduksjon av byggetiden gir en lavere kostnad enn oppgitt. Det er derimot usikkert om kostnaden allerede har tatt byggetiden i betraktning.

FHWA rapporterer at over 40 brokonstruksjoner i Nord-Amerika med UHPC som et koblingsmateriale, ble i 2012 inspisert, der de fastslo at denne metoden presterte bra. Denne metoden ble også påpekt av den norske bransjen i intervjuet å være aktuell for bruk i Norge. Som en av respondentene påpekte, så er det viktig å introdusere riktig materiale inn i riktig bruksområde, noe som kan antas å være aktuelt her. En annen respondent påpekte at problemer med prefabrikkerte brokonstruksjoner er lagerløsning. Siden UHPC allerede benyttes som et koblingsmateriale kan det antas at UHPC kan være en løsning for norske brokonstruksjoner ved å forenkle prefabrikkerte brokonstruksjoner. Det er derimot viktig å ha nok informasjon og kunnskap om materialet for å benytte det, samt at regelverket tillater og godkjenner bruk av UHPC.

Andre typer koblinger med UHPC er vist i figurene 7.8, 7.9 og 7.10. Alle koblingene viser til gjennomgående armering i koblingene, selv om det er avdekket at UHPC har god heft mot betong.

Det er dermed mulig å benytte UHPC i koblinger ved flere typer tilfeller. Figur 7.11 viser også hvordan UHPC kan benyttes som kobling mellom prefabrikkerte boksbjelker. Som presentert eliminerer metoden behovet for overflatebelegg, og overfører skjærkrefter, momenter, aksiale strekk- og trykk- krefter gjennom koblingene. Det forenkler også design- og konstruksjonssystemet. Figur 7.12 viser en kobling mellom søyler og mellomstøtter. Fordelen er at armeringsbehovet reduseres mellom søylen og mellomstøtten. En stor utfordring virker dermed å bli forenklet med UHPC, og metoden kan i tillegg redusere koblingslengden. Bruken av kobling antas i henhold til resultater og teorien å gi store muligheter for brokonstruksjoner, spesielt prefabrikkerte.

UHPC er blitt benyttet som flere rehabiliteringsmetoder i Nord-Amerika, men rehabilitering av brodekker, ofte ved å støpe et UHPC-dekke, er metoden som virker mest ettertraktet. Metoden bidrar til økning i styrke og beskytter mot ytre inntrengninger. Ved et reelt tilfelle av UHPC som belegg over brodekke, ble det gjennomført en studie av FHWA for å vurdere heften mellom UHPC-dekket og betongen. Studien viste at heft mellom UHPC og betong er god. En annen metode ved rehabilitering er å benytte UHPC som påstøp på stålbjelker som vist i figur 7.14. Metoden ivaretar, eller øker kapasiteten til bjelken. Som vist i figuren er det endene av stålbjerkene som blir rehabilitert. Som vist i figur 7.15 kan dette også benyttes på søyler, der det støpes UHPC rundt søylen. Ved rehabilitering virker UHPC igjen å være et fleksibelt materiale som kan benyttes i flere områder. Det antas at disse metodene er noen av mange bruksområder der UHPC er blitt testet ut, men at forsøkene som er presentert var de med størst suksess. God heft og god bestandighet virker å være avgjørende ved rehabilitering, og antas å være veldig aktuelt for bruk også i Norge. Bransjen virket også positive ved denne type bruk av UHPC, og mente på at dette kunne være aktuelt i Norge.

Ved tilfeller i Nord-Amerika der UHPC har blitt benyttet som bærende elementer i brokonstruksjoner er de prefabrikkerte. UHPC-bjelker kan blant annet redusere vekten av elementene og gi lenger spenn sammenlignet med ordinær betong. En brokonstruksjon i Nord-Amerika, som presentert i resultatkapittelet, utgjorde bruken av UHPC at et enkelt spenn på 33,5 m kunne oppnås, fremfor to mellomstøtter. Vekten til UHPC-bjerkene var også 25 % mindre enn de originale. UHPC som bæresystem eller bærebjelker virker å være mindre brukt sammenlignet med andre metoder grunnet høye kostnader for produksjon av UHPC, manglende regelverk og standarder.

UHPC viser derimot til spennende og muligens fordelaktige broløsninger som kan være aktuelt for norsk brobygging. Som nevnt tidligere, virker det ikke som at UHPC som bærende elementer er et alternativ for norsk brobygging i dag, men kan anses å være en løsning i fremtiden. I henhold til teorien og resultatene gjennom intervju og tidligere bruk av UHPC i brobygging, virker koblingsløsninger med UHPC å være et godt alternativ for norsk brobygging. Prefabrikkerte løsninger er allerede et alternativ som er blitt benyttet i Norge, og det anses å være fordelaktig å kombinere UHPC og prefabrikkerte elementer. Fordelene blir vurdert til å bidra til økt bestandighet, raskere byggetid og nye og muligens bedre broløsninger, som kan påvirke miljø og økonomi positivt.

8.4 Eksterne innvirkninger på oppgaven

Underveis i prosjektet oppstod det en global pandemi som kan ha påvirket oppgaven. Oppgaven har ikke blitt fysisk påvirket av pandemien, som ved nedstenging av skole, men det kan ha vært en belastning for oppgaven der respondenter i intervjuene ikke har besvart like utfyllende som tiltenkt. Dette er derimot en antagelse, men det kan tenkes at omgivelsene har påvirket intervjuene. Dette kan også antas å gjelde dialogene med FHWA og Dura Technology.

9 Konklusjon

For å besvare forskerspørsmålet «Hva skal til for at UHPC benyttes i norsk brobygging?» vil underspørsmålene først bli besvart.

1. Hvilke materialer og materialegenskaper har UHPC?

UHPC inkluderer materialer som sementholdige komponenter, finkornet tilslag ofte i form av fin kvarts og/eller fin sand, superplastiserende tilsetningsstoff, stålfiber og vann. Blant sementholdige komponenter virker det å være Portlandsement og mikrosilika som er mest vanlig å benytte i UHPC. Slagg, risaske, flyveaske og kalkstein er også alternative materialer som erstatning til noe av sementen. Naturlig tilslag er også mulig å benytte uten at de mekaniske egenskapene påvirkes. Mengde stålfiber av voluminnholdet til UHPC varierer og har en stor påvirkning for trykkfasthet, strekkfasthet, bøyestyrke og duktilitet. For mye fiberarmering gjør derimot UHPC vanskelig å bearbeide. Materialegenskapene til UHPC varierer avhengig av materialvalg, proporsjoner og herdemetoder. Det er mulig å oppnå en trykkfasthet opp til 200 MPa, strekkfasthet opp til 40 MPa og en bøyestyrke over 30 MPa avhengig av materialinnhold.

Endringer av materialmengder i UHPC kan utføres med hensyn til reduksjon i miljø- og økonomiske kostnader både ved og uten å påvirke egenskapene. Materialer og egenskaper kan bestemmes i henhold til tiltenkt funksjon, for å kunne oppnå en mer kostnadsvennlig UHPC.

2. Hva mener bransjen om bruk av UHPC?

Bransjens mening om UHPC er at materialet må prøves ut og dokumenteres for bruksområder og fordeler. Produktet kan gi gode løsninger for noen bruksområder, men det må introduseres til riktig bruksområde. Bransjen vurderte UHPC som et materiale med både muligheter og hindringer ved bruk i norsk brobygging. Rehabilitering og kobling var bruksområdene som bransjen så størst potensiale med for UHPC grunnet dens gode egenskaper. Det stilles uansett strenge krav til materialer ved forskjellige formål. Standarder, kunnskap og erfaring med UHPC er begrenset, noe som bransjen mener er et stort hinder for å kunne bruke materialet. Bransjen anså UHPC som et dyrt produkt, men anså at materialet også har store muligheter i andre bruksområder, da med tanke på bestandigheten og reduksjoner i materialbruk som følge av mindre tverrsnitt, lenger spenn og lavere overdekning.

3. Hvordan kan UHPC benyttes?

Kobling, rehabilitering, belegg, rekkverk og bæresystem er bruksområder som UHPC kan bli og har blitt benyttet til. Bæresystem virker derimot mindre aktuelt på bakgrunn av store kostnader, og mangler på standarder. Rehabilitering, kobling og belegg er blitt mer brukt i verden, spesielt kobling mellom andre prefabrikkerte elementer. Ved rehabilitering kan UHPC benyttes til å rehabilitere brodekker, bjelker og søyler, både betong og stål. For brokonstruksjoner i Norge er det mer aktuelt å benytte materialet i koblinger og ved rehabilitering. Kostnadene virker også å være større for UHPC sammenlignet med alternative metoder i disse bruksområdene, men fordelene som mer robuste og langvarige løsninger kan gjøre bruken mer aktuell og lønnsom.

Hva skal til for at UHPC benyttes i norsk brobygging?

Materialtilgjengelighet og kunnskap om materialer som benyttes i UHPC virker ikke å være et hinder for norsk brobygging. UHPC er også kjent for bransjen, men bruken av materialet og dens egenskaper samt hensikt i forskjellige bruksområder virker å være mer ukjent. For å benytte UHPC i norsk brobygging må det opprettes standarder og retningslinjer som ivaretar og dokumenterer bruken og designet av materialet. Regelverket gjør at materialet ikke blir vurdert som et alternativ for brobygging. Kunnskap og erfaring med materialet bør oppnås for at entreprenører skal vurdere bruken av UHPC.

Bruk av UHPC i norsk brobygging begrenses med strenge regelverk og manglende kunnskap om materialet. Selv om det også er usikkerheter om UHPC er et økonomisk bærekraftig valg kan det argumenteres med at fordelene som er gitt kan gi økonomiske fordeler, men uten standarder og retningslinjer antas det å være et dyrere alternativ i de fleste bruksområdene. Koblinger og rehabilitering kan derimot virke å være aktuelle bruksområder i norsk brobygging selv uten standarder, siden UHPC oppnår en høy styrke og god bestandighet, og kan være lett å dokumentere i mindre bruksområder. Det kan da være lettere å utvikle standarder i ettertid hvis bruken av produktet viser å være lønnsomt og effektivt. Det kan også argumenteres for at entreprenører bør engasjere bruk av materialet for å skape en etterspørsel for standarder og retningslinjer.

Statlige eller andre aktører må vurdere om bruk av UHPC for fremtidige brokonstruksjoner kan være lønnsomt eller bidra til norsk brobygging. Erfaring, kompetanse og kunnskap om bruken av materialet i brokonstruksjoner virker å øke i andre land. Mulighetene virker å allerede være til stede for å styrke norske brokonstruksjoner, men for at materialet skal kunne benyttes bør det testes ut og vurderes. Materialet er kanskje ikke egnet for alle typer brokonstruksjoner, men kan antas å tilby bedre løsninger for noen metoder.

10 Anbefalinger

Masteroppgaven avdekket området som er interessante som videre arbeider. Følgende anbefalinger er tiltenkt som videre arbeid:

Ved å introdusere bransjen for et nytt materiale som UHPC er det gjentakende at regelverket er et stort hinder for mulig bruk av materialet. Hvorfor står regelverket som en hindring for bruk og produksjon av UHPC? Hva skal eventuelt til for at nye materialer kan introduserer inn i Norge ved å samtidig ivareta regelverket?

Flere punkter ved regelverk og standarder kunne vært interessant å avdekke. Derfor anbefales det å vurdere utenlandske standarder som omfatter alt fra prosjektering, utførelse og kontrollering av UHPC. Hvordan kan slike standarder tas i bruk i Norge?

Ytterligere vurderinger av UHPC som er koblingsmateriale mellom prefabrikkerte broelementer, rehabilitering og som belegg kunne også vært et interessant tema, der det blir valgt å legge fokus på det praktiske og det teoretiske for bruken av UHPC, og/eller fordeler og ulemper ved UHPC sammenlignet med tradisjonelle metoder.

Forskning angående materialegenskaper ved tilhørende materialendringer kunne også vært interessant. Tanker er da at det utført tester for å fastslå materialegenskaper i sammenheng med endring av materialinnhold.

En økonomisk og miljøkostnads vurdering kunne vært interessant for å vurdere om UHPC ved forskjellige formål, som kobling, belegg, rehabilitering eller bjelkeelementer, faktisk har større kostnader enn alternative metoder.

Det kunne også vært interessant å vurdere bruken av UHPC som et brokonstruksjonsmateriale i Norge, der det blir utført en økonomisk og miljøkostnads vurdering. Her kunne det også vært interessant å vurdere vekt mellom de alternative brokonstruksjonene, løsninger, byggetid, og/eller andre interessante temaer for å vurdere bruken av UHPC opp mot andre alternative metoder.

Vurdering av overdekning til UHPC kan være aktuelt som videre arbeider for denne oppgaven. Vurderingen kan inkludere hvor lav overdekningen kan bli uten at ytre inntrengninger eller andre faktorer er et problem.

UHPC som rekkverk ville også vært interessant å vurdere på brokonstruksjoner. Det kunne da vært interessant å vurdere hvilke fordeler og ulemper UHPC har som rekkverk sammenlignet med alternative løsninger.

Til slutt kunne det vært aktuelt og interessant med et videre arbeid fra denne oppgaven, der intervju av bransjen blir utført med en større forståelse, og bredere forklaring av metoder som blir benyttet ved bruk av UHPC i utlandet.

11 Referanser

- [1] K. Søyland, "Bærekraftige betongkonstruksjoner," 21. Desember 2017, https://www.vegvesen.no/fag/fokusomrader/miljo+og+omgivelser/klima/klimagassreduksjoner-i-anlegg-og-drift/attachment/2458416?ts=16653a1f170&fast_title=B%C3%A6rekraftige+betongkonstruksjoner, Lastet ned: 26. Mai. 2020.
- [2] Y. Zhu, Y. Zhang, H. H. Hussein og G. Chen, "Flexural strengthening of reinforced concrete beams or slabs using ultra-high performance concrete (uhpc): A state of the art review," *Engineering Structures*, vol. 205, s. 19, 2020.
- [3] S. Monrad, "Uhpc i brobygging," Universitetet i Agder, Grimstad2019, Lastet ned: 06. Februar 2020.
- [4] U. S. D. O. TRANSPORTATION. 2020. *U.S. Department of transportation, federal highway administration*. Hentet fra: <https://highways.dot.gov/>. Lastet ned: 14. Mars.
- [5] S. Abbas, A. M. Soliman og M. L. Nehdi, "Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages," *Construction and Building Materials*, vol. 75, s. 429-441, 2015.
- [6] J. Pagán-Ortiz, "Ultra-high performance concrete: A state-of-the-art report for the bridge community," June 2013 2013, Lastet ned: 06. Februar 2020.
- [7] R. Yu, P. Spiesz og H. J. H. Brouwers, "Mix design and properties assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete (uhpfrc)," *Cement and Concrete Research*, vol. 56, s. 29-39, 2014.
- [8] B. A. Graybeal, "Uhpc making strides," Jan/feb 2009. Lastet ned: 01. April. 2020, <https://www.fhwa.dot.gov/publications/publicroads/09janfeb/03.cfm>. Hentet fra: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/publicroads/09janfeb/03.cfm>
- [9] C. Shi, Z. Wu, J. Xiao, D. Wang, Z. Huang og Z. Fang, "A review on ultra high performance concrete: Part i. Raw materials and mixture design," *Construction and Building Materials*, vol. 101, s. 741-751, 2015.
- [10] A. C. Institute, "Aci concrete terminology," ACI Concrete Terminology Farmington Hills, MI 48331, U.S.A.2013, www.concrete.org.
- [11] F. H. Administration, "Design and construction of field-cast uhpc connections ", Lastet ned: 24. April. 2020Hentet fra doi: FHWA-HRT-19-011 Hentet fra: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/bridge/uhpc/19011/19011.pdf>
- [12] U. D. o. T. Federal Highway Administration, "Ultra-high performance concrete connections for prefabricated bridge elements ", https://www.fhwa.dot.gov/innovation/everydaycounts/edc_4/factsheet/ultrahigh_performance_concrete.pdf, Lastet ned: 23. April. 2020.
- [13] S. Monrad, "Egenprodusert," utg., 2020.
- [14] D. I. Jacobsen, *Hvordan gjennomføre undersøkelser? Innføring i samfunnsvitenskapelig metode.*, 3. utg. Oslo: Cappelen Damm AS, 2016.
- [15] I. D. I. V. Zachary Haber, Benjamin Graybeal, Brian Nakashoji, and Rafic El-Helou, "Properties and behavior of uhpc-class materials " U.S Department of Transportation, Federal Highway Administration Research, Development, and Technology Turner-Fairbank Highway Research Center, 6300 Georgetown Pike, McLean, VA 22101-2296 2018, Hentet fra: Publication FHWA-HRT-18-036, Lastet ned: 25. April. 2020.
- [16] U. D. o. T. Federal Highway Administration, "Project case study, replacement of bridge 1-438 on blackbird station road, ultra-high performance concrete connections and deck overlay " 2017, https://www.fhwa.dot.gov/bridge/abc/docs/Blackbird-Station-Road_casestudy.pdf, Lastet ned: 24. April. 2020.

- [17] J. M. Zachary Haber, Igor De la Varga, and Benjamin Graybeal, "Ultra-high performance concrete for bridge deck overlays," Turner-Fairbank Highway Research Center, Research, Development, and Technology, Turner-Fairbank Highway Research Center, 6300 Georgetown Pike, McLean, VA 22101-2296,
<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/bridge/17097/17097.pdf>,
Lastet ned: 29. April. 2020.

12 Vedlegg

- Vedlegg 1 Dialog med DURA Technology angående UHPC i brokonstruksjoner.
- Vedlegg 2 Dialog med FHWA angående UHPC i brokonstruksjoner.
- Vedlegg 3 Intervju – Fremgangsmåte ved kontakt av respondent.
- Vedlegg 4 Intervju – UHPC i brobygging i Norge
- Vedlegg 5 A3-poster – UHPC i norsk brobygging, Steffen Monrad