



Nye materialer for bruk i tunnel og bru

Etatsprogrammet Varige konstruksjoner 2012-2015

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 557



Tittel

Ny materialer for bruk i tunnel og bru

Undertittel

Etatsprogrammet Varige konstruksjoner 2012-2015

Forfatter

Ole Øystein Knudsen, Dirk Nolte, Rune Gaarder, Tor Arne Hammer

Avdeling

Trafikksikkerhet, miljø- og teknologiavdelingen

Seksjon

Tunnel og betong

Prosjektnummer

603242

Rapportnummer

Nr. 557

Prosjektleder

Synnøve A. Myren/ Harald Buvik

Godkjent av

Bård Pedersen

Emneord

Varige konstruksjoner, bru, tunnel, nye materialer

Sammendrag

Denne rapporten inngår i en serie rapporter fra Statens vegvesens etatsprogram Varige konstruksjoner, 2012-2015.

Hensikten med rapporten har vært å gå gjennom aktuelle fremtidige materialer for ulike komponenter i tunneler og bruer.

Title

New materials in tunnels and bridges

Subtitle

Durable structures 2012-2015

Author

Ole Øystein Knudsen, Dirk Nolte, Rune Gaarder, Tor Arne Hammer

Department

Traffic Safety, Environment and Technology Department

Section

Tunnel and concrete

Project number

603242

Report number

No. 557

Project manager

Synnøve A. Myren/ Harald Buvik

Approved by

Bård Pedersen

Key words

Durable structures, bridges, tunnels, new materials

Summary

This report belongs to a series of reports from the R&D-programme Durable structures 2012-2015, carried out by the Norwegian Public Roads Administration.

This report gives a review of relevant future materials for various components in tunnels and bridges.

Forord

Denne rapporten inngår i en serie rapporter fra **etatsprogrammet Varige konstruksjoner**. Programmet hører til under Trafikksikkerhet-, miljø- og teknologiavdelingen i Statens vegvesen, Vegdirektoratet, og foregår i perioden 2012-2015. Hensikten med programmet er å legge til rette for at riktige materialer og produkter brukes på riktig måte i Statens vegvesen sine konstruksjoner, med hovedvekt på bruer og tunneler.

Formålet med programmet er å bidra til mer forutsigbarhet i drift- og vedlikeholdsfasen for konstruksjonene. Dette vil igjen føre til lavere kostnader. Programmet vil også bidra til å øke bevisstheten og kunnskapen om materialer og løsninger, både i Statens vegvesen og i bransjen for øvrig.

For å realisere dette formålet skal programmet bidra til at aktuelle håndbøker i Statens vegvesen oppdateres med tanke på riktig bruk av materialer, sørge for økt kunnskap om miljøpåkjenninger og nedbrytningsmekanismer for bruer og tunneler, og gi konkrete forslag til valg av materialer og løsninger for bruer og tunneler.

Varige konstruksjoner består, i tillegg til et overordnet implementeringsprosjekt, av fire prosjekter:

- Prosjekt 1: Tilstandsutvikling bruer
- Prosjekt 2: Tilstandsutvikling tunneler
- Prosjekt 3: Fremtidens bruer
- Prosjekt 4: Fremtidens tunneler

Varige konstruksjoner ledes av Synnøve A. Myren. Mer informasjon om prosjektet finnes på vegvesen.no/varigekonstruksjoner

Denne rapporten tilhører **Prosjekt 4: Fremtidens tunneler** som ledes av Harald Buvik. Prosjektet skal bidra til at fremtidige tunneler bygges med materialer, utførelse og kontroll bedre tilpasset det miljøet konstruksjonene er utsatt for. Prosjektet skal bygge videre på arbeidet i Moderne Vegtunneler, samt innspill fra Prosjekt 2: Tilstandsutvikling tunneler, med hovedfokus på tunnelkonstruksjonen i et levetidsperspektiv. Prosjektet skal resultere i at installasjoner i fremtidige tunneler oppnår tiltenkt levetid med reduserte og mer forutsigbare drift- og vedlikeholdskostnader.

Rapporten er utarbeidet av Ole Øystein Knudsen, Dirk Nolte, Rune Gaarder og Tor Arne Hammer, alle SINTEF, på oppdrag fra Varige konstruksjoner.

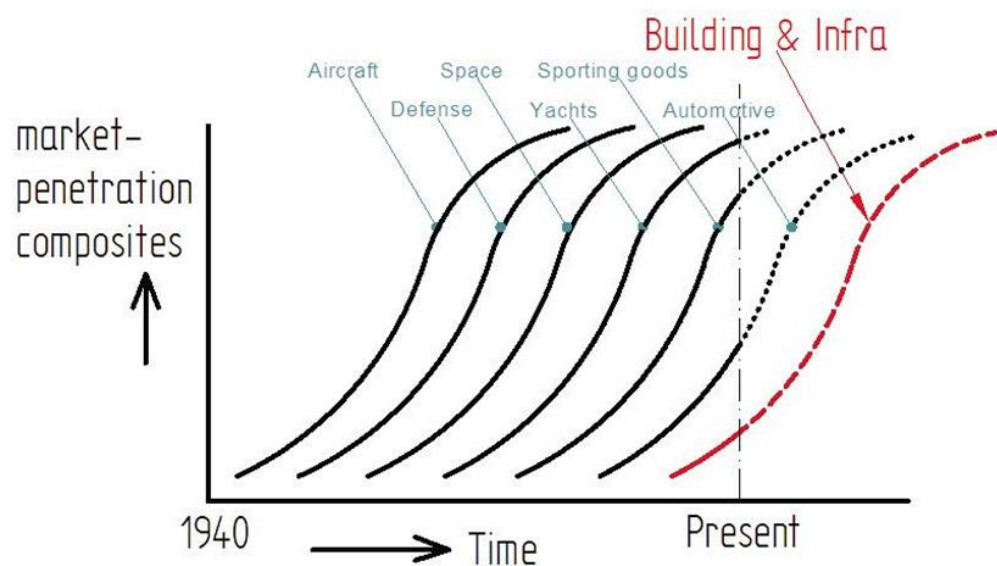
Rapport

Nye materialer for bruk i tunnel og bru

Forfatter(e)

Ole Øystein Knudsen

Dirk Nolte, Rune Gaarder, Tor Arne Hammer



Rapport

Nye materialer for bruk i tunnel og bru

EMNEORD:
zinc; Duplex Coatings;
belegg; Korrosjon;
Materialteknologi

RAPPORTNR SINTEF A27441	VERSJON 3.0	DATO 2016-03-10
-----------------------------------	-----------------------	---------------------------

FORFATTER(E)
Ole Øystein Knudsen
Dirk Nolte, Rune Gaarder, Tor Arne Hammer

OPPDRAGSGIVER(E)
Statens Vegvesen

OPPDRAGSGIVERS REF. Harald Buvik	ANTALL SIDER OG VEDLEGG: 24
--	---------------------------------------

GRADERING Unrestricted	GRADERING DENNE SIDE Unrestricted	ISBN 987 82 14 14 05855 0
----------------------------------	---	-------------------------------------

SAMMENDRAG

Denne rapporten er levert til Statens Vegvesen i forbindelse med etatsprogrammet Varige Konstruksjoner. Hensikten med rapporten har vært å gå gjennom aktuelle fremtidige materialer for ulike komponenter i tunneler og bruer. Arbeidet er utført som en del av prosjektet "Vurdering av korrosjonsbeskyttelse for stålbruer" utført ved SINTEF på oppdrag fra Statens Vegvesen under Saksnummer 2014059758.

UTARBEIDET AV
Ole Øystein Knudsen

KONTROLLERT AV
Astrid Bjørgum

GODKJENT AV
Daniel Blucher

Dokumentet har gjennomgått SINTEFs godkjenningsprosedyre og er sikret digitalt

Historikk

VERSJON	DATO	VERSJONSBEKRIVELSE
1.0	2016-01-13	Første versjon
2.0	2016-02-08	Revidert etter innspill fra Statens Vegvesen
3.0	2016-03-10	Diverse språkvask og mindre korrigeringer

Innholdsfortegnelse

1	Innledning	4
1.1	Bakgrunn	4
1.2	Målsetning	4
2	Tunnel	5
2.1	Alternativer til PE-skum for vann- og frostsikring	5
2.2	Bergsikringsbolter	5
2.3	Bolter og beslag for montering av vann- og frostsikring	6
2.4	Lysarmaturer og kabelstiger	7
2.5	Vifter	8
2.6	Nød-kiosker, skiltbokser og skiltrammer	8
2.7	Pumpesystemer for sjøvann	9
3	Brumaterialer for framtiden	10
3.1	Polymere og fiberforsterket polymermateriale	10
3.2	Glassfiber (GF), karbon (CF) og aramid (AF) fiber til forspente konstruksjoner.....	13
3.3	Biopolymerer	13
3.4	Tre	14
3.5	Aluminium.....	15
3.6	Stål	18
3.7	High-performance betong	19
3.8	Rustfritt stål	20
3.9	Brubane.....	22
4	Referanser	23

BILAG/VEDLEGG

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Denne rapporten er levert til Statens Vegvesen i forbindelse med etatsprogrammet Varige Konstruksjoner. Hensikten med rapporten har vært å gå gjennom aktuelle fremtidige materialer for ulike komponenter i tunneler og bruer. Vurderingene for materialer i tunnel bygger videre på Statens Vegvesen rapport nr. 410, "Korrosjonsbeskyttelse i tunneler".

Materialvalg er vurdert med hensyn på følgende egenskaper:

- Lang levetid
- Høy sikkerhet for trafikanter
- Riktig kvalitet
- Sikkerhet, helse og arbeidsmiljø (SHA)
- Høy oppetid
- Reduserte drifts- og vedlikeholdskostnader
- Anleggskostnader for fremtidige tunnelkonstruksjoner som gir optimale levetidskostnader

Arbeidet er utført som en del av prosjektet "Vurdering av korrosjonsbeskyttelse for stålbruer" utført ved SINTEF på oppdrag fra Statens Vegvesen under Saksnummer 2014059758.

1.2 Målsetning

Målsetning med denne rapporten har vært å gå gjennom materialer for eventuell fremtidig bruk i norske veitunneler og veibruer.

Følgende komponenter og materialer inngår i vurderinga for tunnel:

- Bergsikringsbolter
- Bolter og beslag for montering av vann- og frostsikring
- PE-skum for vann- og frostsikring
- Lysarmaturer og kabelstiger
- Vifter
- Nød-kiosker, skiltbokser og skiltrammer
- Pumpesystemer for sjøvann

For bruer er det sett på komponenter og materialer til bruoverbygning. Hovedvekten er lagt på fiberarmerte polymerkompositter, men aluminium, tre, stål og betong er også diskutert.

2 Tunnel

2.1 Alternativer til PE-skum for vann- og frostsikring

Den vanligste måten å redusere brennbarheten til PE på er bruk av fosforforbindelser, brom eller bromforbindelser sammen med f.eks. antimon trioksid. Flammehemmere har imidlertid liten effekt på brennbarheten til PE ved en tunnelbrann. Flammehemmere hindrer effektivt antennelse av materialer når energitilførselen er begrenset. Ved tunnelbrann er som regel energitilførselen så stor at flammehemmet materiale likevel vil antennes. Brannsikring av PE-skum i norske tunneler gjøres derfor ved tildekking med sprøytebetong.

Det er utviklet et brannhemmende og lettvekt skummateriale basert på nanocellulose og grafenoksid [1]. Det blir nevnt at lavkonduktive materialer som aerogel er for skjøre til bruk i bygninger. Løsninger av cellulose nanofibre, grafenoksid og sepiolite (mykt hvitt mineral av leire) nanostaver har vist seg ved "freeze-casting" å kunne danne materialer med meget lav varmekonduktivitet og stor motstand mot forbrenning. Om og eventuelt når slike materialer blir kommersielt tilgjengelige, og til hvilken pris, er det for tidlig å si noe sikkert om.

En annen gruppe polymere som naturlig brenner dårlig er fenoler. Fenolskum er alternativer til støpte harde skum, f.eks. polyuretaner benyttet i sandwichkonstruksjoner med metalliske eller ikke-metalliske huder. Skummet har stort sett lukkede celler og har derfor lavt vannopptak og vandampgjennomgang. I stedet for kassettsystemer med bruk av metallisk hud og mineralull kan man tenke seg kassetter laget av sandwichmaterialer med fenol i både laminat og kjerne. Det finnes mye erfaring og litteratur på bruk av slike materialer i blant annet marine anvendelser [2]. Statens Vegvesen har en viss erfaring med fenolplater som ble prøvd for noen år tilbake. Det ble da konkludert med at det medførte noe utfordrende produksjon, spesielt i forhold til fuktgjennomslag.

Det er også rapportert bruk av andre polymere enn PE i kompositter med høy flammeresistens. En metode for å lage et materiale basert på Kynar (PVDF-kopolymer) og en glassfiberarmering ble utviklet på begynnelsen av 2000-tallet [3,4]. En ulempe er dog at skummet ikke består av lukkede celler. Skummet er beskrevet som "essentially non-flamable". Det er utviklet en prosess som muliggjør skumming av PVDF-materiale med tettheter i området $0.03 - 1.5 \text{ g/cm}^3$ [5]. Egenskaper til det skummede materialet er gitt i [6]. En tilsvarende variant av skummet PVDF er også tilgjengelig [7]. Generelt sett er PVDF en polymer med god kjemisk resistens, men prisen ligger på et helt annet nivå enn f. eks. skummet PE.

Et annet skum som har vært på markedet i noen år og som blir benyttet i en rekke industrielle anvendelser er skummet PET (Polyetylen-tereftalat). Flammehemmende varianter av dette materialet benyttes i skinnegående materiell samt i fartøyer og luftfart [8-11]. Det er rapportert at sandwichpaneler med PET-skumkjerne sammen med intumiserende maling har vist seg å ha god brannresistens og har vært anvendt med hell i f.eks. taket på jernbanestasjoner [12]. Felles for disse er nok at prisen på skummet PET er høyere enn for PE.

2.2 Bergsikringsbolter

Materialeegenskapene som ønskes er:

- Høy strekkfasthet
- Temperaturbestandighet (brann)
- Korrosjonsbestandighet

I dag benyttes varmforsinkede og pulverlakkerte stålbolter av type B500NC. Disse boltene har lav pris sammenlignet med alle andre aktuelle materialer og vil være attraktive også i fremtiden. Den største utfordringen med materialet er holdbarheten i visse korrosive miljø, spesielt der de kontinuerlig eksponeres for høy fuktighet eller rennende vann, sjøvann spesielt, men også ferskvann.

Bergsikringsbolter som gyses vil være eksponert mot alkalisk gysemørtel og er korrosjonsbeskyttet av mørtelen. Varmforsinkede og pulverlakkerte bolter har derfor svært lang levetid når de er gyst. Funksjonen til gyste bolter er ikke avhengig av de delene av boltene som eksponeres på utsiden av fjellet (rene bergsikringsbolter). Gysing løser derfor alle korrosjonsproblemer og bør benyttes hvis mulig der det er korrosjonsutfordringer.

Bolter av polymerkompositt er ikke utsatt for korrosjon og vil kunne benyttes i svært korrosive miljø, se seksjon 3.1. Brann er imidlertid en reell trussel mot boltens funksjon. Å gyse en komposittbolt vil kunne redusere problemet, men siden boltene holder berget på plass gjennom en forbindelse inne i fjellet er brannrelatert temperaturstigning som starter fra fjelloverflater og strekker seg til dypere sjikt in i fjellet et tema som må evalueres. Gysing av komposittboltene vil imidlertid trolig fjerne motivasjonen for å bruke denne typen bolter, siden stålbolter da likevel vil fungere uproblematisk.

Rustfrie kamstålbolter er kommersielt tilgjengelig i ulike typer austenittisk stål med omkring 17% krom og 9-13% Ni (for eksempel EN 1.4301 og 1.4401). Disse legeringen er imidlertid ikke sjøvannsbestandige. Duplex stål EN 1.4462 er det lavest legerete stålet som trolig holder ved eksponering mot sjøvann. Dette er imidlertid ikke verifisert enda. Legeringen er heller ikke kommersielt tilgjengelig som kamstål, og må spesialbestilles for denne anvendelsen. Gysing av varmforsinkede og pulverlakkerte bolter virker derfor som et bedre alternativ enn rustfrie bolter.

Andre materialer anses foreløpig ikke som gode alternativer siden de ikke løser problemet (bergsikring) på en bedre måte eller ved redusert kostnad over levetiden.

2.3 Bolter og beslag for montering av vann- og frostsikring

Materialeegenskapene som ønskes er:

- Høy strekkfasthet
- Temperaturbestandighet (brann)
- Korrosjonsbestandighet

Varmforsinkede og pulverlakkerte stålbolter og beslag vil i de fleste tunneler være en sikker og prisgunstig løsning også i fremtiden. Den største utfordringen med materialet er også her holdbarheten i korrosive miljø, spesielt der de kontinuerlig eksponeres for høy fuktighet eller rennende vann. Sjøvann er spesielt utfordrende, men også ferskvann kan medføre problemer for sinkbelegget. Det er viktig at varmforsinkingen og pulverlakkering er spesifisert og utført på riktig måte og at materiell brukes riktig uten å skade overflatene. Belegget kan lett skades ved feil håndtering av materialet på byggeplassen. Varmforsinking og pulverlakkering av gjengene på boltene har også visse begrensninger. For bolter med diameter under 20 mm kan ikke lakken være for tykk av hensyn til gjengenes gripeevne. I dag er gjennomsnittlig lakkykkelse satt til 55 µm. Hvis dette skal økes vil innvendig diameter på mutteren måtte økes, hvilket vil svekke skrueforbindelsen. For bolter med høyere diameter benyttes grovere gjenger, slik at tykkere lakk kan tolereres. Gjenger består nødvendigvis også av skarpe kanter der lakkykkelsen alltid vil bli tynnere. Gjengene vil derfor alltid være et svakt punkt med hensyn på korrosjon. I tillegg vil lakken lett skades når mutteren skrues på, slik at sinkbelegget eksponeres. Sinkbelegget har begrenset korrosjonsmotstand hvis det konstant eksponeres mot fuktighet, som i hvert fall må forventes for noen av boltene. Statens Vegvesen har noen dårlig erfaringer med bruk av pulverlakk på eksponerte flater på grunn av kvaliteten på lakkebelegget.

På noen flater skaller lakken av i store flak og på andre flater er det observert stor konsentrasjon av nålestikk. I landtunneler tilsier erfaringene at dette problemet har vært mindre, mens i sjøtunneler er kvaliteten på pulverlakken helt avgjørende for å oppnå ønsket levetid. Strengere spesifikasjoner og bedre mottakskontroll kan redusere problemet.

Bolter og beslag i rustfritt materiale kan være et alternativ, om riktig type rustfritt er valgt. Man må imidlertid opp i svært edle kvaliteter for å oppnå nødvendig korrosjonsbestandighet i sjøtunneler. Som nevnt over er ikke EN 1.4404 bestandig mot sjøvann. Duplex stål kan holde (EN 1.4462). Superduplex (EN1.4410) og høylegert austenittstål (EN 1.4547) vil stå uten korrosjonsproblemer. EN 1.4462 er kommersielt tilgjengelig som gjengebolter. Titan er ikke utsatt for korrosjon ved de betingelsene man har i tunneler, men kostnadene for dette materialet gjør at det er lite aktuelt. Koblinger mellom rustfritt og andre materialer må utføres riktig for å unngå galvanisk korrosjon [13].

Kompositt vil løse korrosjonsproblemet, men på samme måte som for bergsikringsbolter vil manglende bestandighet ved brann trolig ekskludere det fra denne anvendelsen.

Per i dag ser vi ingen alternativer til stål i denne anvendelsen. Det kan tenkes at alternative overflatebehandlinger kan forbedre korrosjonsegenskapene. Det er imidlertid sannsynlig at disse vil være mer kostbare enn varmforsinking og pulverlakkering, siden dette er svært kostnadseffektive belegg. Duplex stål (EN 1.4462) ser i dag ut til å være et aktuelt alternativ til varmforsinket og pulverlakkert gods, men det bør undersøkes om korrosjonsbestandigheten er tilstrekkelig i sjøtunneler.

2.4 Lysarmaturer og kabelstiger

Lysarmaturer består av forskjellige elementer, men har til felles en kasse, elektronikk, lyselement og reflektor.

Polymere kan være et godt alternativ for kassen i stedet for lakkert karbonstål, siden lysarmaturen ikke må bære mer enn seg selv. En kan også tenke seg en løsning i rustfritt stål eller hel-aluminium. Varmforsinket og pulverlakkert stål vil også ha lang levetid.

Uansett sier erfaringer at selve elektronikken i lysarmaturene er svakeste punkt og at armaturene ikke er et vesentlig problem. Når en lysarmatur svikter blir normalt hele armaturen byttet ut, istedenfor å skifte komponenter. Levetiden til materialene har derfor i liten grad vært begrensende til nå. I framtiden blir LED teknologi dominerende i lysmarkedet. Her er oppbygningen av lampene noe forskjellig og elektronikken muligens mer robust. Utfordringer her må evalueres etter en signifikant bruksperiode.

Kabelstiger av ulike materialer og overflatebehandlinger har vært benyttet, stort sett med godt resultat. Kabelstigene står oppunder taket i tunnelen og i de fleste tilfeller ganske tørt, slik at korrosiviteten ofte er begrenset, spesielt i tunneler med lav trafikk tetthet. Kun varmforsinket stål kan derfor i mange tilfeller fungere fint. Ved større trafikkbelastning bør varmforsinkingsbelegget lakkeres eller males for å øke levetiden, siden SO₂ fra trafikken gjør atmosfæren mer aggressiv mot sink. Rustfrie legeringer som for eksempel EN 1.4404 vil stå godt, men er dyrere. Varmforsinking og varmforsinking med pulverlakk vil være gode alternativer også i fremtiden.

2.5 Vifter

Levetiden til vifter er ofte begrenset av viftemotor og elektronikk, eller kollisjon med kjøretøy. Materialskafer er imidlertid også rapportert på følgende komponenter [14]:

- Korrosjon på viftehus
- Erosjon på vifteblader
- Slitasje i maskinlager

Selv om det er rapportert skader på viftehus er det også rapportert om gode erfaringer, for eksempel med varmforsinket og lakkerte hus. Det antas at polymerbaserte viftehus er mulig å realisere siden UV strålingen som bryter ned polymeren er sterk redusert eller helt fraværende i tunell. Varmforsinket og pulverlakkert/våtlakkert stål vil være en sikker og prisgunstig løsning også i framtiden. Rustfritt stål eller aluminium kan vurderes, men riktig legering må da velges til formålet. Overflatebehandlet stål vil trolig ha lavere kostnad.

Det er rapportert en del skader på selve viftebladene. Viftebladene produseres som regel i en aluminium støpelegering. Skadene som har oppstått er en kombinasjon av erosjon på bladene ved treff av partikler i lufta og påfølgende korrosjon. Erosjonen svekker eller skader det beskyttende oksidet på overflata slik at metallet under kan korrodere. Viftebladene beskyttes ofte med belegg. Her er det en viss utvikling av nye erosjonsbestandige belegg drevet av vindkraftbransjen, som krever svært erosjonsbestandige belegg. Det er rimelig å anta at disse beleggene også kan benyttes på viftebladene. I vindkraft benyttes også erosjonsbeskyttende tape på bladene, som helt sikkert vil ha en beskyttende effekt på vifteblader også. Krav til brannklasse for ventilator vil trolig begrense materialvalg for vifteblader til metalliske materialer. Aluminium virker derfor som et godt materialvalg også for fremtiden, men andre legeringer og fremstillingsmetoder (valset eller ekstrudert aluminium) kan være alternativer til støpt materiale.

Når det gjelder maskinlager har disse feilet først og fremst på grunn av feil i smøringen. Kulelageret går tørt med påfølgende metallisk kontakt og slitasje. Forbedringer kan derfor trolig oppnås ved at smøringen forbedres. Det er allment anerkjent at vanligste årsak til svikt i kulelager er mangelfull smøring eller feil i automatisk tilførsel av smøremiddel [15]. En vesentlig forbedring kan trolig oppnås ved å gå over til keramiske kulelager. Keramiske kulelager tåler generelt tøffere forhold, for eksempel høyere trykk og høyere hastigheter. De gir generelt lengre levetid, tåler bedre marginal smøring, gir lavere friksjon, er ikke utsatt for korrosjon og trenger mindre vedlikehold. En annen viktig fordel med keramiske kulelager er at forseglede hybrid kulelager (keramiske kuler mot stål løpebane) kan ha betydelig lengre levetid enn kulelager av stål. En annen typisk årsak til svikt i kulelager er forurensning av smøremidlet med harde partikler. Tilstedeværelse av harde partikler øker både friksjon og slitasje. Denne effekten kan også reduseres ved bruk av keramiske kuler, som er mindre berørt av harde partikler. Keramiske kulelager har historisk hovedsakelig vært brukt i avanserte systemer, for eksempel romfart, på grunn av høy pris. På grunn av nye kostnadseffektive produksjonsmetoder har prisen gått ned, slik at de nå tas i bruk i stadig flere anvendelser. Det er imidlertid verdt å nevne at keramiske komponenter har lavere bruddseigheten sammenlignet med metalliske, samt at behovet for smøring er ikke til å komme utenom.

2.6 Nød-kiosker, skiltbokser og skiltrammer

Dette er komponenter som står eksponert i trafikkrommet og som ofte er fremstilt i aluminium. Erfaringene er noe blandede og det er rapportert om tilfeller av korrosjon. Alvorlige angrep på aluminium i tunnel har vært forårsaket av galvanisk kobling til stål eller at materialet har vært eksponert mot svært korrosivt miljø bak vann- og frostsikringsshvelv i undersjøiske tunneler (kombinert med for tynn baksidelakk). Filiformkorrosjon på lakkert aluminium er også rapportert, men dette er ikke kritisk for komponentens funksjon eller levetid og bør ikke være et argument mot bruk av aluminium.

Vi mener at aluminium er et egnet materiale for alle komponenter som står i trafikkrommet. Ved å unngå direkte kobling mellom aluminium og stål vil problemet med galvanisk korrosjon elimineres. Filiformkorrosjon kan også unngås ved tilstrekkelig avvirkning i forbehandlingsprosessen eller ved å anodisere aluminiumet i stedet for å lakkere. Anodisert aluminium vil ha høy motstand mot korrosjon og ikke være utsatt for filiformkorrosjon. Anodiseringen bør være 20 µm tykk. Lakk på aluminiumen øker ikke korrosjonsbestandigheten, siden små skader i lakken kan føre til groppkorrosjon.

2.7 Pumpsystemer for sjøvann

Ønskede materialegenskaper:

- Motstand mot korrosjon
- Motstand mot erosjon
- Motstand mot slitasje i bevegelige deler

Tabell 1 lister opp de mest brukte materialene i sjøvannspumper i dag. Kun metalliske materialer vil kunne gi den ønskede bestandigheten mot erosjon og slitasje. EN1.4404 er billigste alternativ, men erfaringsmessig er det ikke tilstrekkelig korrosjonsbestandig. Vi mener kun de høylegerte materialene har tilstrekkelig korrosjonsmotstand til å stå ubeskyttet (kanskje duplex EN 1.4462, helt sikkert superduplex EN1.4410 og høylegert austenittstål/6 Mo EN 1.4547).

To alternativer kan vurderes:

- Beskyttelse med offeranoder. Anodene må da skiftes med jevne mellomrom. Anodeforbruket kan være betydelig på grunn av strømningshastigheten.
- Innvendig belegging av pumpa med erosjonsbestandige keramiske belegg. Epoksybelegg fylt med harde keramiske partikler har vært benyttet til reparasjon av pumper. Termisk sprøytete belegg av hardmetall (metallbelegg med keramiske partikler) har svært høy motstand mot erosjon og slitasje, men ikke alltid ønsket korrosjonsbestandighet. Det vil dessuten være kostbart.

Når det gjelder selve pumpeledningen gjelder de samme betraktningene omkring rustfrie materialer der som for pumpene. Erosjonsbelastningen vil imidlertid ofte være mindre slik at polymermaterialer og kompositter bør vurderes i tillegg.

Tabell 1. Alternative materialer for sjøvannspumper i bruk i dag [16]

Komponent	Kostnad/levetid					
	Lav	Medium	Medium	Høy	Svært høy	Svært høy
Generelt materialvalg	EN 1.4404 (syrefast/C-stål)	EN 1.4404 (syrefast)	Aluminium-bronse	EN 1.4462 (duplex)	EN 1.4410 (superduplex)	EN 1.4547 (6 Mo)
Hus	EN 1.4404 EN 1.4408	EN 1.4404 EN 1.4408	Aluminium-bronse	EN 1.4462	EN 1.4410	EN 1.4547
Impeller	EN 1.4404 EN 1.4408	EN 1.4404 EN 1.4408	Nikkel-aluminium-bronse	EN 1.4462	EN 1.4410	EN 1.4547
Innløp/utløp	Belagt C-stål	EN 1.4404	Aluminium-bronse	EN 1.4462	EN 1.4410	EN 1.4547
Aksel	EN 1.4404	EN 1.4404	Nikkel-kobber	EN 1.4462	EN 1.4410	EN 1.4547
Lager	Bronse Gummi	Bronse Gummi	Bronse Gummi	Bronse Gummi Harde belegg	Bronse Gummi Harde belegg	Bronse Gummi Harde belegg
Bolter	EN 1.4404	EN 1.4404	Nikkel-kobber	EN 1.4462	EN 1.4410	EN 1.4547

3 Brumaterialer for fremtiden

Noen av framtidens mest spennende bru- og brukonstruksjoner er nylig diskutert i media. Eksempler finnes relatert til "Fergefri E39", der Statens Vegvesen blant annet ser på muligheten for å realisere verdens første "rørbru" 2025 [17,18]. Noen spesielle brukonstruksjoner er dermed valgt og under bygging, som for eksempel hybridbruer, som aldri før har blitt bygget i Norge. Disse er bare realiserbare gjennom høy kompetanse i material og materialkombinasjoner for å tilfredsstille de tekniske kravene. Eksempler her er Harpe Bru, en "ekstradosed" bru, som er en hybrid av to tradisjonelle brutyper, skråkabelbru og spennarmert bjelkebru [19]. Her finns ikke noe regelverk i EC systemet som kan anvendes direkte, men franske regelverk dekker konstruksjonen [20].

Bruer er, og vil bli i økende grad, en miks av materialer og materialfamilier. Om en belyser materialvalg for framtidens bruer, som gir et stort spenn i forskjellige utfordringer, er svaret på materialvalg komplekst. I tillegg er det viktig at ikke bare bruens funksjonalitet er belyst om en evaluerer materialer, men også at bruinstallasjonsrelaterte effekter er evaluert, som installasjons- og bru-byggekostnad inkl. transport, relaterte kostnader til konsumert energi under materialproduksjon, materialtransport, miljøbelastning, resirkulering, osv. Parallelt kommer aspekter inn som konsekvenser relatert til selve bruinstallasjonen (stengt veg), inspeksjonskostnader, signaleffekt, osv. "Power Road" tankegangen er satt i liv av Vegvesenet der en ser på kostnads- og energirelaterte effekter langs hele verdikjeden, helt fra materialproduksjon, materialtransport, bygningsmassen, bruksfasen, osv. til resirkulering. I Power Road tankegangen skal bruene bidra til energiproduksjon! Så, en ny funksjonalitet er tatt med inn i tillegg til oppgaven å knytte to punkter sammen. Vi ser videre at nye tankegangen som "Rørbru konstruksjoner" fører til nye utfordringer: disse inkluderer problemstillinger fra tunneller. Alt dette viser at bildet er kompleks.

Tradisjonelt er bruer og brukonstruksjoner laget basert på en materialmiks som gir en optimal løsning: materialer er kombinert med hverandre for å komme fram til riktig og forutsigbar oppførsel over livsløpet. Utfordringen for konstruksjoner med en bred materialmiks er ikke i å evaluere strukturell respons og levetid av et material, men å ha detaljert kunnskap rundt oppførsel og effekt av forbindelser mellom materialer, ved knutepunkter, sammenføyninger, osv. Eksempler hvor flere materialer er kombinert for å finne fram til en optimal lettvekt løsning er Harpe Bru, referert til lenger opp, og London Millenium Bridge vist under [21]. I det følgende er materialer diskutert etter type, men smarte kombinasjoner av materialer vil være framtidens svar på mange utfordringer.

The London Millennium Bridge is 330m long with 3 spans of 81, 144 and 108m and has two very large piers in the river. It has a steel structure and an aluminium deck, supported by very shallow suspension cables. It is a lightweight bridge by conventional standards, weighing in at 660 tonnes.



Figur 1: Lettvekt bru realisert gjennom smart materialbruk [21].

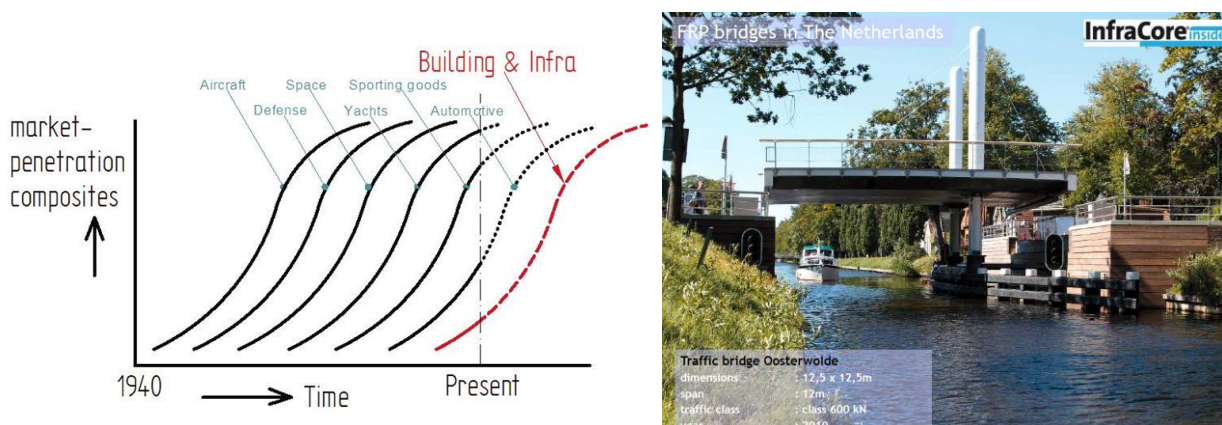
3.1 Polymere og fiberforsterket polymermateriale

Plast/polymere er egnet for bruk i bygningskonstruksjoner, spesielt på grunn av lav tetthet, høy kjemisk motstand, høy lystransmisjon, fargbarhet, og enkle formingsprosesser. De viktigste ulemper med plast er lav

E-modul, høy reologisk formbarhet, lav termisk motstand og aldring forårsaket av UV-stråling. For bruk i bruer i Statens vegvesen er det krav til at regler for det enkelte prosjekt avklares skriftlig med Vegdirektoratet før oppstart, se håndbok N400 Bruprosjektering, punkt 10.3 [45]. Strekkstyrken av plast, uten forsterkninger er 10 - 80 MPa, men forsterkning med glassfiber muliggjør en økning av denne verdi til 130 - 600 MPa. Elastisitetsmodulen til plast er forholdsvis lav (2 GPa), men plast armert med glassfiber kan oppnå verdier som kan sammenlignes med stål (55 GPa). Styrken er imidlertid svært avhengig av belastningens orientering i forhold til fibre. Parallelt med fibre vil det oppnås en styrke som beskrevet over, mens på tvers er styrken langt lavere. Dette problemet kan til dels løses ved design av materialet og konstruksjonen. Det er også dokumenterte anvendelser av kombinasjoner som polymer – betong (PC), polymer -sment - betong (PCC), neopren (chloroprene gummi) brulagre osv. Polymer spiller en svært viktig rolle som lim, bruk i laminære dragere av tre, som betonglim, osv. Harpiks er også nyttiggjort for reparasjon ved å injisere dette i sprekker i betong og mur og for å feste stål eller CFRP (Carbon fiber–reinforced polymer) bånd elementer som benyttes for styrking av betong og stål strukturer.

Bruer i fiberforsterket polymermateriale finns i dag i flere land. Internasjonalt kan det vises til flere brukonstruksjoner som enten er hovedsakelig av FRP (fiber–reinforced polymer) materiale, eller der bruoverbygningen er erstattet med FRP materiell, se eksempler under [19]. Nederland er et land der FRP materialet er brukt i brukonstruksjoner. Nøkkelpersoner fra Statens Vegvesenet har vært på ekskursjon i Nederland i forbindelse med FRP bruk.

Hovedargumentet for å bruke komposittmaterialer er det samme som for andre lette materialer som aluminium: å spare vekt i konstruksjonen, økt belastningen med slank konstruksjon, produsere brua i fabrikk og transportere den til bruksstedet (rask installasjon = kort stengning av veien), osv. Å spare vekt er ofte viktig, men det er også eksempler på at en viss vekt er ønskelig i forhold til fundamentering. En viktig forskjell i forhold til metaller er at komposittmaterialer ikke kan resirkuleres per i dag.



Figur 2: Venstre: utvikling i materialbruk av Fibre Reinforced Polymer Composite (FRP) i forskjellige faser sett fra produsenten FibreCore 2012 [22]; høyre: FRP heve/senke bru [22]



Figur 3: FRP bruer bygget i Kolding, Danmark (venstre) og Lleida, Spania (høyre) [21]

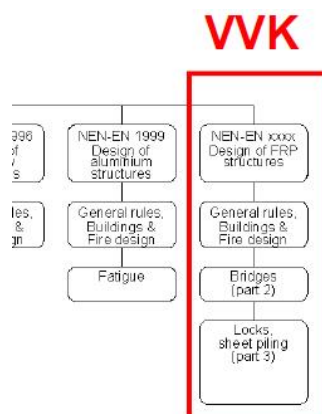


Figur 4: FRP bru realisert i Fredrikstad, Norge [21]

I dag eksisterer materialbeskrivelser for forskjellige komposittmaterialer og materialkombinasjoner som inkluderer forskjellige typer FRP. Disse blir brukt for å designe og forutsi bruens egenskaper ved installasjonstidspunktet. Vanskeligere er det å forutsi degradering av materialet over tid som følge av temperatur, miljø, mekaniske skader, osv. Her er flere forskningsaktiviteter initiert og gjennomført. Men fortsatt er det stor behov for forskning her.

Flere patenter og løsninger er beskrevet som skal forhindre kjente skader som er karakteristisk for FRP brudeler [22]. Flere bedrifter og institusjoner har kommet langt i å forstå utfordringer og beskrive løsninger relatert FRP. Per i dag eksisterer det imidlertid ikke noen designhåndbok for FRP-bruer i Norge. Det jobbes for tiden med å utvikle en NS-EN standard, se bildet under.

- CUR96 + klar end 2012
- Draft Eurocode Fiber Reinforced Polymer (FRP) klar 2015
- Eurocode FRP klar i 2018
- Innføring av Euro Kode FRP tidligst i 2020



Figur 5: Planene for ny EN kode for FRP bru

3.2 Glassfiber (GF), karbon (CF) og aramid (AF) fiber til forspente konstruksjoner

Disse blir vanligvis brukt som kabler eller tråder med ca 60 - 65 % epoksybase. Største fordelene er lav tetthet, ca. fire ganger lavere enn for stål, men tilsvarende styrke. Elastisitetsmodul og bruddforlengelse er imidlertid lavere enn for stål [23].

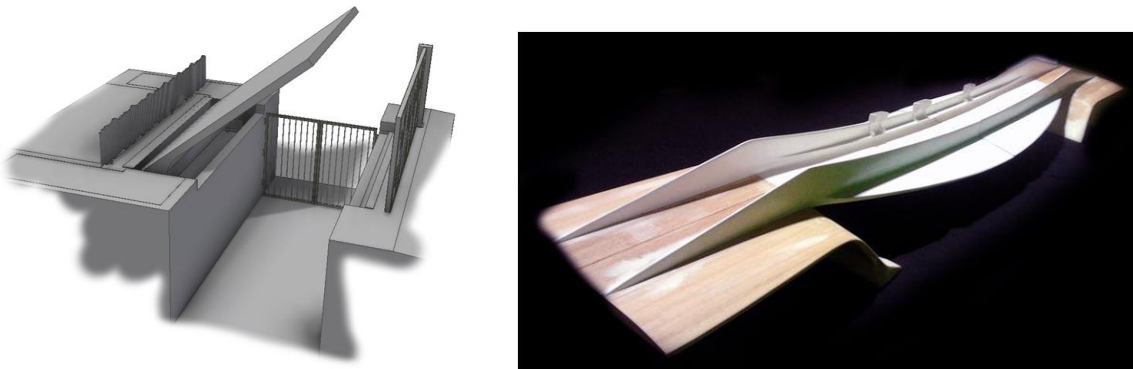
3.3 Biopolymerer

I forbindelse med FRP materialer må biopolymerer som blir mer og mer brukt i andre bransjer, nevnes. Byggebransjen har blitt et stort bruksområde for biopolymerer i andre land. Det er anslått i artikler at omsetningen av Biopolymer i verden er høy (i 2000 ca. $2 \cdot 10^9$ USD på verdensbasis) og at veksten er forventet å fortsette [25].

I bilbransjen er biopolymer brukt i dag i mange områder, hovedsakelig i ikke-bærende konstruksjoner. I andre bransjer derimot, som møbelindustrien, finnes det mange forskjellige anvendelser som også inkluderer bærende elementer. Disse er ikke værutsatt. Det finns også eksempler der biopolymerer er anvendt i sikkerhetsrelevante vegprosjekter, for eksempel er biopolymer brukt i Nederland i komponenter langs vei [25], se bilde nede. Det er også kjent at det ble nylig åpnet en bru som er laget i biopolymermateriale i Nederland [26].



Figur 6: Biopolymer brukt i Nederland i komponenter langs vei [25]



Figur 7: Venstre: bru som er realisert i Biopolymer [19], høyre: planer om Biopolymer bru [27]

3.4 Tre

Tre har alltid vært et av de mest anvendte byggematerialene, men tatt i betraktning sin begrensede levetid (15 - 25 år) og dårlige fuktmotstand og brannmotstand, har trekonstruksjoner alltid hatt begrenset levetid. Det er derfor bare noen få trebruer som har overlevd (for eksempel Kappelbru i Lucerne, fra 1333). Utviklingen innen trearbeid og produksjonsteknologi de siste tiårene har resultert i følgende: (i) økt holdbarhet på grunn av riktig preservering, slik at det nå kan sammenlignes med strukturer av stål og betong og (ii) trekonstruksjoner bygget i dag er nesten utelukkende laget i kontrollerte industrielle prosesser, som reduserer kostnadene signifikant. I det 21. århundre er tre lett tilgjengelig, enkelt å bearbeide og har lav vekt, samt at det vil utvilsomt tjener som et supplement til betong og stålkonstruksjoner [23].

Modifisert tre (Kebony) er et alternativ til truede tropiske tresorter og tradisjonelt impregnert tre. Her er det utviklet en miljøvennlig teknologi som gir mulighet for å oppgradere egenskapene til bærekraftig fremstilt trevirke. I prosessen benyttes en væske utvunnet av planteavfall fra sukkerrørsproduksjon, furfurylalkohol. Ved hjelp av trykk og vakuumpump samt varmebehandling bindes væsken til treets cellestruktur for å forbedre egenskapene til trevirket permanent. Kebony blir fremstilt av FSC sertifisert lønn (Forest Stewardship Council), furu og amerikansk furu (SYP). Sammenliknet med for eksempel burmateak, har lønn fra Kebony et CO₂-avtrykk på kun en tiendedel [28]. Kebony er et giftfritt og vedlikeholdsritt alternativ til annet

trevirke. Siden produktet har vært kort tid på markedet er det vanskelig å si noe om levetid foreløpig, men leverandøren garanterer 30 år. Kebony fikk Svanemerket i 2004.

3.5 Aluminium

Historisk sett har bruken av aluminium i bruer vært begrenset av følgende årsaker [29-31]:

- den relativ høye investeringskostnaden for aluminium, sammenlignet med betong og stål
- mangel på kunnskap om aluminium i konstruksjoner hos de fleste bruingeniører
- den historiske mangel på designkoder, standarder og prosjekteringsregler for utforming av aluminiumbruer
- usikkerhet rund sveisede forbindelser og relatert utmattingsproblematikk

Til tross for disse ulempene har aluminium vært brukt med hell i et antall bru-prosjekter i årenes løp [32] fordi det også har en rekke fordeler sammenlignet med de materialer som vanligvis brukes i brukonstruksjon (dvs. betong, stål og tre). For bruk i bruer i Statens Vegvesen er det krav til at regler for det enkelte prosjekt avklares skriftlig med Vegdirektoratet før oppstart, se håndbok N400 Bruprosjektering, punkt 10.1 [45]. Tidligere regelverk i Håndbok 185 "Prosjekteringsregler for bruer. Tilleggsbestemmelser for prosjektering av aluminiumskonstruksjoner" omhandler konstruksjon med aluminium. Konstruksjon med aluminium krever en annen tilnærming enn konstruksjon med stål for å utnytte aluminiums gode egenskaper på en optimal måte. For at aluminiumstrukturer skal være konkurransedyktige sammenlignet med strukturer bygget av konvensjonelle konstruksjonsmaterialer, må konstruksjonen være designet for å utnytte de positive egenskapene til aluminium [32]:

- lav vekt (dvs. lav tetthet, høy styrke - til-vekt -forhold)
- høy korrosjonsmotstand (obs: galvanisk korrosjon ved kobling til stål eller andre mer edle materialer)
- høy grad av formbarhet => dvs. muligheten til å ekstrudere komplekse, tilpassede profiler/former

Eksempler:

a) I 1956 ble den første aluminiumbru på kontinentet bygget - Schwansbell Bridge i Tyskland [33]. På grunn av den lave vekten ble elementene pre-fabrikkert og deretter fløtet til byggeplassen. Sammenlignet med den planlagte stål bru, noe som ville ha veide 60 tonn, var vektreduksjonen ved hjelp av aluminium på omtrent 58 prosent. Den gangen ble elementene sammenføyd med aluminiumnagler, laget av det samme materialet som elementene. En rapport fra 2006 [34] om tilstanden til bruene viser at minimalt med nedbrytning ble funnet etter mer enn 50 års tjeneste over en kanal, i industrielt miljø.

b) Statens Vegvesen har vært involvert i utvikling av kunnskap som muliggjorde design og bygging av aluminiumbruer: fra 1993 til 1995 ble følgende Expomat prosjektet gjennomført:

"M11 – Brukonstruksjoner", en NFR støttet prosjekt med mål om å "utvikle brukonstruksjoner for det norske og internasjonale markedet" med bakgrunn i "akselererende vedlikeholdskostnad på stål og betongbruer".

Dette munnnet ut i løsninger for aluminium relatert til bru som ble formidlet i et bredt seminar i 1996, "Aluminium i Brukonstruksjoner". Muligheter og utfordringer ble beskrevet i samarbeid mellom Vegvesenet, industrien, NTNU (tidl. NTH), SINTEF og Sverges KTH. Delprosjekter "Brudekke", "Rekkverk", "Bæresystemer", og "Sveising/utmating" ble gjennomført og resultatene offentliggjort.



Figur 8: Naglet Aluminium bru fra 1956 – fortsatt i bruk. [34] Material: EN AW- 6082, Spenn på 44.20 m, total bredde 5,10 m, anvendbar bredde på 4.50 m, kjørebane 3,50 m. Nettovekt 25 tonn, for et kjøretøy opp til 12 tonn.

Forsmo-brua ble bygget i 1996 i aluminium, basert på resultater fra prosjektet. Denne 39 m lange brua, med maksimal aksellast 21 ton, ble satt på plass i ett stykke. Overbygning bestående av stålbjelker med betongdekke ble erstattet med den sveisede aluminiumkonstruksjonen. Man valgte å beholde den gamle pilaren og begge landkarene. Brua er etter 20 år i god stand, og ingen vedlikeholdskostnader er registrert relatert materialet aluminium. Pilaren og landkarene er heller ikke rapportert skadet, selv om de ikke var spesielt tilpasset konstruksjonen. Nå, 20 år etter prosjektslutt, har ikke bare kunnskapen om materialet aluminium vokst, men også kunnskap og verktøy for å designe og konstruere i aluminium, slik at konstruksjonsoppførsel er mer forutsigbart. Dermed blir aluminiumkonstruksjoner enda sikrere og bestandige, selv komplekse sveisede, naglede og boltede strukturer. At dette har lyktes er bevist i utallige prosjekter mot offshoreindustrien, der en høy standard er satt. Mange store teleskop gangbruer er levert og er fortsatt i bruk. Relevante standarder for aluminiumkonstruksjoner eksisterer.



Figur 9: Forsmo bru, bygd i 1996, uten rapportert skade/vedlikehold relatert til aluminium.

Status på aluminium brukt som brukonstruksjonsmateriale ble beskrevet i 2012 i en rapport for 'Aluminium Association of Canada' [32]. Her blir det blant annet konkludert at:

- Aluminiumbruer viser god ytelse; noe som kan dokumenteres nesten 80 år tilbake
- Fordeler i å bygge bruer utelukkende av aluminium er vist i et stort antall prosjekter. De mest vellykkede applikasjoner har også inkludert å erstatte bruoverbygning med aluminium, flytende bruer av aluminium, og midlertidige bruer av aluminium.
- En rekke standarder finnes for å sikre at utformingen av aluminium brustrukturer blir vellykket.

c) I senere år har kompetanse i bruk av aluminium og tilgang utviklet seg såpass at aluminiumbruer også kommer gunstig ut på kostnadsberegninger: et eksempel er her en gangbru i Tyskland, 2008: Aluminiumversjonen er med 140.000 Euro er den billigste løsningen, mens en betongkonstruksjon ville koste 300.000 euro [35], se Figur 11. Flere studier ved Technical University (TU) München ved Prof. D. Kosteas (i denne sektoren en anerkjent ekspert) har demonstrert at aluminiumbruer kan være betydelig billigere enn sammenlignbare bruer av stål, betong eller tre på lang sikt. Den relativt lave etterspørselen (status 2009) fører Prof. Kosteas tilbake til lite kjennskap til bruk av aluminium hos de respektive beslutningstakere [35].



Figur 10: Aluminium bruer i Canada [32]



Figur 11: Venstre: bru i Aluminium, Tyskland, 2008 [35]; høyre: bru over motorvei A5, Tyskland 2009 [36]

3.6 Stål

Såkalte duktile ståltyper som har høy strekkfasthet og trykkfasthet blir mer og mer brukt. Dette muliggjør konstruksjoner av bøyde stålelementer med lange spenn, som for noen år siden var utenfor rekkevidde [23]. Nye legeringer vil bli tatt i bruk fortløpende, inkludert rustfrie ståltyper.

I nyere tid er Cortenstål mye anvendt. Corten stål ruster ca. 6-8 ganger tregere enn vanlig stål – under forutsetning av at materialene regelmessig tørker helt opp [22]. Materialet er forhåndsrustet, og får raskt et ytre beskyttende rustlag. For bruk i bruer i Statens Vegvesen er det krav til at regler for det enkelte prosjekt avklares skriftlig med Vegdirektoratet før oppstart, se håndbok N400 Bruprojektering, punkt 1.13.4 [45]. Vegvesenet ville forby stålet i 2014 [37]: "Det viser seg at korrosjonen fortsetter lenger og med større hastighet enn vi ble forespeilet. Levetiden til elementer bestående av rusttregt stål er dermed kortere enn vi antok, sier Olav Grindland, sjefingeniør i bruseksjonen hos Statens vegvesen". Ved en inspeksjon av et antall rekkverk langs og ved E6 i 2014 ble det funnet at det ikke nødvendigvis dannes tette og beskyttende korrosjonsprodukter. Spesielt i områder med utstrakt veisalting ble det funnet løse korrosjonsprodukter som i stor grad flaket av [38]. Det er rimelig å anta at ønsket levetid ikke vil oppnås i slike tilfeller.



Figur 12: Corten stål i bru. Vnstre: HØSE bru, 2014, høyre: Can Gili footbridge, 2009

3.7 High-performance betong

Betong er det mest brukte konstruksjonsmaterialet, først og fremst pga. potensielt lang levetid og relativt lav pris. En utfordring, spesielt ved lange bruspenn, er at egenvekten utgjør en betydelig del av den opptredende lasten. De senere års utvikling (etter ca. 1980) har derfor gått i retning av 1) **høyere fasthet**; "høyfast betong" for å kunne bygge slankere konstruksjoner, og 2) **lavere egenvekt**; "høyfast lettbetong". Utilstrekkelige krav til bestandighetsstyrende parametere kombinert med ny materialteknologi for å oppnå høy fasthet førte til at mange bruer bygd på 1970-80 tallet opplevde store skader etter relativt kort tid (spesielt pga.

armeringskorrosjon). Derfor ble bestandighetsstyrende parametere i standardverket betydelig skjerpet på 90-tallet, noe som også gir mulighet til å prosjektere for 100 års levetid. Det innebærer blant annet at kravet til overdekning over armeringen har økt betydelig. Større overdekning medfører større betongvolum og dermed også høyere vekt av konstruksjonen. **Rustfri armering** som rustfritt stål og basalt-kompositt-armering er alternativer som krever betydelig mindre overdekning. Pris og egenskaper ser foreløpig ut til å ha hindret stor utbredelse av disse, men kan likevel representere et stort potensiale i fremtidige konstruksjoner.

Fiberarmering kan betraktes som et "rustfritt" alternativ/supplement til stangarmering, i tillegg til et betydelig bidrag til redusert arbeidsmengde. I dag brukes fiberarmert sprøytebetong til bergsikring av tunneler, samt i dekker på grunn og i noen grad i vegger. I bruer brukes det i liten grad fiber, men man har begynt å se på fiber som et supplement til stangarmering. Spesielt i kantdragere på bruer er det aktuelt med fiber for å redusere opprissing. Fiber vil kunne erstatte deler av stangarmeringen i bruer. En studie gjort av COWI (fordrag av Carola Edwardsen under fib-symposiet i Stockholm 2012) viser at slikt supplement også kan bidra til forbedret bærekraft for brubygging. I skrivende stund er norsk betongforening i ferd med å ferdigstille en veiledning for bruk og dimensjonering av konstruksjoner med fiberbetong, basert på arbeid i COIN-prosjektet som SINTEF har hatt sammen med bransjen.

En annen driver for fremtidens betong er **bærekraftighet**, og spesielt kravet til redusert CO₂-avtrykk. Siden sementproduksjon er den store synderen (utslipp fra sementproduksjon utgjør ca. 5 % av verdens totale CO₂-utslipp) er det satt inn store ressurser på å utvikle sementer og tilhørende produksjonsprosesser for å minimalisere dette CO₂-utslippet. Norcem har sågar en "0-visjon"; null CO₂-utslipp fra sementproduksjon innen 2030. Et annet bærekraft-moment er uttak og transport av tilslagsmaterialer til betong (tilslag utgjør 65-70 % av betongvolumet). Behovet for å bruke lokale materialer, for eksempel fra tilhørende vegbygging ("spregningsstein") øker, og medfører behov videreutvikling av både knuseteknologi og betongteknologi.

I det siste ti-året har flere forskningsmiljø i verden utviklet såkalt "**Ultra High Performance Concrete**", UHPC. Det er en betong med trykkfasthet 150-200 MPa. Den er ofte fiberarmert og har ekstremt god bestandighet. UHPC er således et "Columbi-egg" i forhold til ønsket om slankhet og lang levetid. Studier har blant annet vist at den kan bidra til god bærekraft og kostnadseffektive løsninger for bl.a. bruer, selv om sementinnholdet er høyere enn for dagens brubetonger (fordelen er betydelig slankere konstruksjoner). UHPC har vært brukt i en del mindre bruer flere steder i verden. Det kanskje mest kjente store byggeprosjektet med UHPC er rullebanen på "Haneda-airport" i Japan støpt med ca 24 000 m³ UHPC. Med tanke på store konstruksjoner så har UHPC utfordrende støpelighetsegenskaper. SINTEF er for tiden med i et prosjekt på utvikling av UHPC for store marine konstruksjoner, og hvor utvikling av støpeprosess står sentralt.

Forskning på avanserte tilsetninger til betong øker i omfang og forventes å spille en mer betydelig rolle i fremtiden. Som eksempel nevnes nanofærer (SINTEF Materialer og Kjemi), og som skal videreutvikles i EU-prosjektet "LORCENIS" med tanke på å forbedre store betongkonstruksjoners egenskaper i ekstreme miljøer. På Chalmers University studerer man for tiden bruk av Grafen i betong, og med positive resultater så langt.

3.8 Rustfritt stål

Rustfritt stål er brukt i mange komponenter både i tunneller og bruer. Utviklingen i materialkunnskap kan åpne nye bruksområder eller utvide eksisterende. Tabell 2 viser rustfritt materialer brukt per i dag i brukonstruksjoner i Norge [39].

Duplex stål, det vil si stål som inneholder både austenitt og ferritt, er spesielt interessant (eksempler: 1.4162, 1.4362, 1.4410, 1.4482, 1.4501, 1.4507). De to hovedtypene dupleksstål er EN 1.4462 med 22 % krom og 5 % nikkel, og superdupleks EN 1.4410 med 25 % krom og 7% Ni. Duplex rustfritt stål har et stort potensial i fremtidige bruksstrukturer. Gjennom sin høye styrke, seighet og duktilitet kombinert med utmerket korrosjonsmotstand kan dette føre til mange fremtidige anvendelser for bærekraftige broer [40].

Duplex rustfritt stål er stadig mer brukt som konstruksjonsmateriale i bygg og arkitektur på grunn av sine gode mekaniske egenskaper. Flytegrensen ved romtemperatur kan være mer enn det dobbelte av standard austenittisk rustfritt stål. Over de siste årene har materialet begynt å spille en økende rolle i bygging av bruer. Duplex rustfritt stål er for det meste valgt på grunn av sin kombinasjon av høy styrke og korrosjonsmotstand. Deres fulle potensial brukes på steder der materialet kommer i kontakt med sjøvann, eller der det er høye konsentrasjoner av klorider. Den høye kostnaden ved å velge dupleks rustfritt stål i konstruksjoner sammenlignet med konstruksjonsstål, må veies opp mot lengre levetid og lavere vedlikeholds- og reparasjonskostnader. Siden de er fullstendig resirkulerbare er de ofte mer bærekraftige enn ikke-metalliske løsninger [40].

Dupleks rustfritt stål har en høy styrke til vekt forhold. Større spenn er dermed mulig, som kan forenkle konstruksjonen [40].

Metallurgien til dupleks rustfritt stål er mye mer kompleks enn for austenittisk eller ferrittisk stål. Dupleks stål kan danne en rekke uønskede faser hvis varmebehandlingen ikke utføres riktig. Disse fasene fører til sprøhet, dvs. tap av bruddseighet. Spesielt sigma-fase vil ha denne effekten. Sigma-fase kan dannes når kjølehastighet under produksjon eller sveising ikke er rask nok [41,42].

For rustfrie stål opereres det med en såkalt PRE-verdi, som står for "Pitting Resistance Equivalence". PRE beregnes ut fra legeringens sammensetning etter følgende formel:

$$PRE = 1 \times \%Cr + 3.3 \times \%Mo + 16 \times \%N \text{ (w/w)}$$

Stål med $PRE > 32$ betraktes som bestandige i sjøvann. EN 1.4404 har en PRE-verdi på 27, mens 1.4462 har en PRE-verdi på 35. EN 1.4404 er følgelig ikke sjøvannsbestandig, hvilket også er godt dokumentert, mens EN 1.4462 ofte blir betraktet å være det. Det er imidlertid temperaturavhengig, slik at det bør vurderes i hvert tilfelle der man tenker å benytte EN 1.4462 i sjøvann.

Tabell 2: Tabell over rustfritt stål brukt på bruer [39].

Stål	Regelverk	Bruksområde	Kommentar
A4-80	NS-EN ISO 3506	Alt festemateriell (skrue, mutre, skiver, gjengestenger, hylser)	A4-80: er standard handelsvare. Tåler IKKE sjøvann!
1.4401 1.4362 med flere	NS 3576-5 NS-EN 10088	Rustfritt kamstål, forbindelse mot overgangsplate og i betongledd	Krav om PRE-verdi større enn 20.
	NS 3576-5 NS-EN 10088	Øvrig rustfritt kamstål	Kvalitet vurderes i hver enkelt tilfelle
1.4404 1.4435 1.4436	NS-EN 10088	Deksler, rør, rammer, overvannsrør, klammer, klemlister, beslag, dører, kabelstiger, gjenstående forskaling osv.	1.4404 er standard handelsvare, stålene tåler ikke sjøvann, men tåler kloridholdig avrenningsvann, avhengig av sveising, tilstedeværelse av spalter og temperatur
1.4410 1.4547 (1.4462)	NS-EN 10088	Alt rustfritt stål i kontakt med sjøvann	1.4462 kan benyttes etter særskilt vurdering
1.4404 1.4418 1.4435 1.4436	NS-EN 10088	Innslissede stålplater i trebruer	Rustfritt skal benyttes der det ikke er utskiftbart
	NS-EN 10088 Andre	Konstruktivt stål	Kvalitet vurderes i hvert enkelt tilfelle



Figur 13: Rustfritt stål i bru. Venstre: The Helix, Marina Bay, Singapore [40]; Høyre: Piove di Sacco Bridge under konstruksjon, Padua, Italy [40]

3.9 Brubane

Som nevnt vil framtidige bruer være en multimaterialkonstruksjon. Her skal spesielt nevnes brubaneløsninger. Både FRP baserte løsninger og aluminiumløsninger eksisterer for lettvekt brubaner.

I 2012 ble noen eksisterende brubaneprodukter i aluminium identifisert og uthevet av Canadas Aluminium Association [32]:

- ALCOA og Alumadeck (Reynolds) systemer fra USA og
- Svensson dekk fra Sverige (SAPA).

En betydelig fordel ved systemene er at de ikke inneholder sveiser, noe som gir redusert sannsynlighet for utmatningsproblemer. Svensson brubane har så lav vekt som 1/10 del av vekten av en tilsvarende betongversjon [43]. Andre fordeler med aluminium brubaner inkluderer muligheten for rask erstatning (24 timer installasjoner er mulig) og økt holdbarhet (opp til 80 års holdbarhet er lovet av en produsent). Aluminium brudekk har derfor nylig blitt brukt i korttids bruerstatningsprosjekter som i Sandisfield, ferdigstilt i løpet av våren 2012 [44]. Denne strukturen består av et ekstrudert og friksjonssveiset aluminium bruoverbygning satt på fire dragere av galvanisert stål. Den har et spenn på 17,7 m, en bredde på 4,2m, og ble i sin helhet fabrikkert i fabrikk. Den ble deretter transportert til området på en lastebil og løftet på plass med kran. Konstruksjonens vekt var 1/5 del av et tilsvarende betongdekke.

En viktig anmerkning er at overgang mellom lettvekts brubaner til andre brudeler, som også inkluderer landkarer, må utformes slik at alle materialets positive egenskaper utnyttes maksimalt. Dette er et rent designspørsmål ikke et materialspørsmål.

Videre er alle konstruksjoner som er montert opp på brua viktig å optimalisere for vekt. Lettvekt rekkverk, stolper, kantbjelker etc. vil bidra til å øke bruens bæreevne.

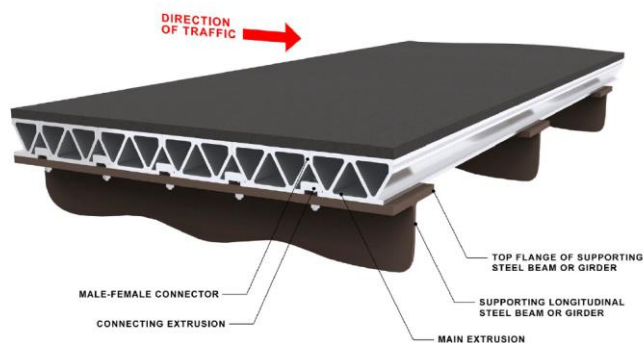


Figure 3. Extruded aluminum bridge deck system.



Figure 8. Use of aluminum in secondary bridge components.

Figur 14: Venstre: aluminium i dekk konstruksjon; høyre: utvidet bruk av aluminium i sekundær struktur.

4 Referanser

1. Bernd Wicklein, Andraž Kocjan, German Salazar-Alvarez, Federico Carosio, Giovanni Camino, Markus Antonietti & Lennart Bergström, *Thermally insulating and fire-retardant lightweight anisotropic foams based on nanocellulose and graphene oxide*, Nature Nanotechnology 10, 277–283 (2015)
2. <http://www.epfa.org.uk/properties.htm>
3. PVDF latex foam composites provide high flame resistance, *Plastics technology*, Nov. 2002.
4. <http://www.actontech.com/pdf/ultraflex-foam-bruchure.pdf>
5. New technology permits PVDF foaming. *Plastics technology*, March 2013.
6. Zotefoam ZOTEK® F40 HT LS PVDF Foam:
<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=265692b49bfa4663870db65d74312c2d&ckck=1>
7. Solvay, Solef® 80 000 e-PVDF High performance foam, http://www.solvay.com/en/binaries/Solef-80000-High-Performance-Foams_EN-220736.pdf
8. Airex® R82 skum. <http://www.3accorematerials.com/airex-r82-fire-resistant-dielectric-foam.html>
9. Gurit® G-PET™ FR – Fire retardant structural core, <http://www.gurit.com/files/documents/guritgpet-frv8pdf.pdf>
10. PET-skum fra Armacell:
[http://www.armacell.com/C1256AF100412A28/F/NT0161998A/\\$FILE/Welded_FR_EU.pdf](http://www.armacell.com/C1256AF100412A28/F/NT0161998A/$FILE/Welded_FR_EU.pdf)
11. Armacell – conference showcase, *Reinforced plastics*, Vol 59, Issue 4, July-August 2015, Pages 183-184
12. Fabienne Samyn, *Intumescence as method for providing fire resistance to structural composites: Application for PET foam sandwich structured composite*, *Composite Interfaces*, 06/2013, 20(4)
13. O.Ø. Knudsen: "Korrosjonsbeskyttelse i tunneler", Statens Vegvesen rapport nr 410, 2015.
14. Carl Lewin: "Materialteknisk sluttrapport – Karmøytunnelen Fv 47, T-forbindelsen", 2014.
15. Rolling contact silicon nitride bearing technology: a review of recent research. *Wear* 246 (2000) 159–173
16. Stephen J. Morrow: "Materials selection for seawater pumps," *Proceedings of the 26th international pump users symposium*, 2010
17. <http://www.tu.no/samferdse/2015/09/23/verdens-forste-rorbru-kan-sta-ferdig-i-2025>
18. <http://www.tu.no/samferdse/2015/03/10/bjornafjorden-kan-fa-verdens-langste-flyte--eller-rorbru>
19. <http://www.tu.no/samferdse/2015/11/10/denne-brua-blir-norges-forste-av-sitt-slag>
20. Christensen, Arne: Harpe bru Norges første såkalte extradosede bru, *Brukonferansen*, Oslo nov. 2012
21. Ir. Jan Peeters: Composiet in GWW; toepassing, "do's & don'ts"; *Symposium Composiet Constructies in GWW*, 12 juli 2012
22. <http://www.nisjemetall.no/Default.aspx?PageID=18052012130928>
23. K. Flaga: Advances in materials applied in civil engineering, *Journal of Materials Processing Technology* 106, 173-183, 2000
24. J. Planck: Applications of Biopolymers in Construction Engineering, *Major Building Materials*, vol 10-17
25. van Rooijen, Daan: BIOCOSIETEN Stenden PRE, <http://www.greenpac.eu/wp-content/uploads/2015/03/D.-van-Rooijen-17-mrt-Stenden-BBE-event.pdf>
26. Kendall, D.: Fibre reinforced polymer composite bridges, *National Composite Network*, 2006
27. Centre of Expertise Biobased Economy, *Biobased composietbrug*: <http://www.biobasedbrug.nl/>
28. Kebony, <https://no.wikipedia.org/wiki/Kebony>
29. Siwowski, T.: Aluminum Bridges – Past, Present and Future, *Structural Engineering International*, 4:286-293, 2006
30. Das, S. K. & Kaufman, J. G.: Aluminum Alloys for Bridges and Bridge Decks, *The Minerals, Metals & Materials Society*, 61-72, 2007
31. Tindall, P.: Aluminium in Bridges, *ICE Manual of Bridge Engineering*, 345-355, 2008
32. S. Walbridge and A. de la Chevrotière: Opportunities for the use of Aluminum in Vehicular Bridge Construction, *aluminium association of Canada*, June 2012

33. Mader, W. & Pieper, A.: Schwansbell Bridge Celebrating 50th Birthday, Structural Engineering International, 4:356-359, 2006
34. <http://www.aluinfo.de/index.php/aluminium-news/items/aluminium-bridge-over-datteln-hammkanal-celebrates-its-50th-birt.html>
35. <http://www.aluinfo.de/index.php/gda-news-de/items/leichte-fussgaengerbruecken-sind-zunehmend-aluminiumkonstruktion.html>
36. <http://www.ingenieurbau-trends.de/alu-bruecke-ueber-die-a5/>
37. <http://www.tu.no/samferdsel/2014/01/08/vegvesenet-vil-forby-rusttregt-stal>
38. Arve Johansen: "Inspeksjon av rekkverk på E6", Rapport nr 3030-13-014381, Teknologisk Institutt, 2014
39. Email fra Pedersen Bård med vedlagt tabell som vist: Subject: Kommentarer til rapporten Nye materialer, 27. november 2015 13:26
40. N.R. Baddoo, A. Kosma: Sustainable Duplex Stainless Steel Bridges, The Steel Construction Institute, Ascot, UK and Euro Inox, Brussels, Belgium, 2015, in: www.sustainablestainless.org/applications
41. BSSA, Regus, Blades Enterprise Centre, Duplex Stainless Steels - A Simple Guide, on: <http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=668>
42. TMR Stainless, Pittsburgh, PA, USA: Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels, 2014, ISBN 978-1-907470-09-7
43. Arrien, P., Bastien, J., & Beaulieu, D.: Rehabilitation of Bridges Using Aluminum Decks, Canadian Journal of Civil Engineering, 28(6):992-1002, 2001
44. SAPA bridge deck: www.sapagroup.com/en/na/profiles/products/aluminum-bridge-decking
45. Statens Vegvesen: Håndbok N400, Bruprojektering, 2015



Teknologi for et bedre samfunn

www.sintef.no



Statens vegvesen
Vegdirektoratet
Publikasjonsekspedisjonen
Postboks 8142 Dep 0033 OSLO
Tlf: (+47 915) 02030
publvd@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Trygt fram sammen