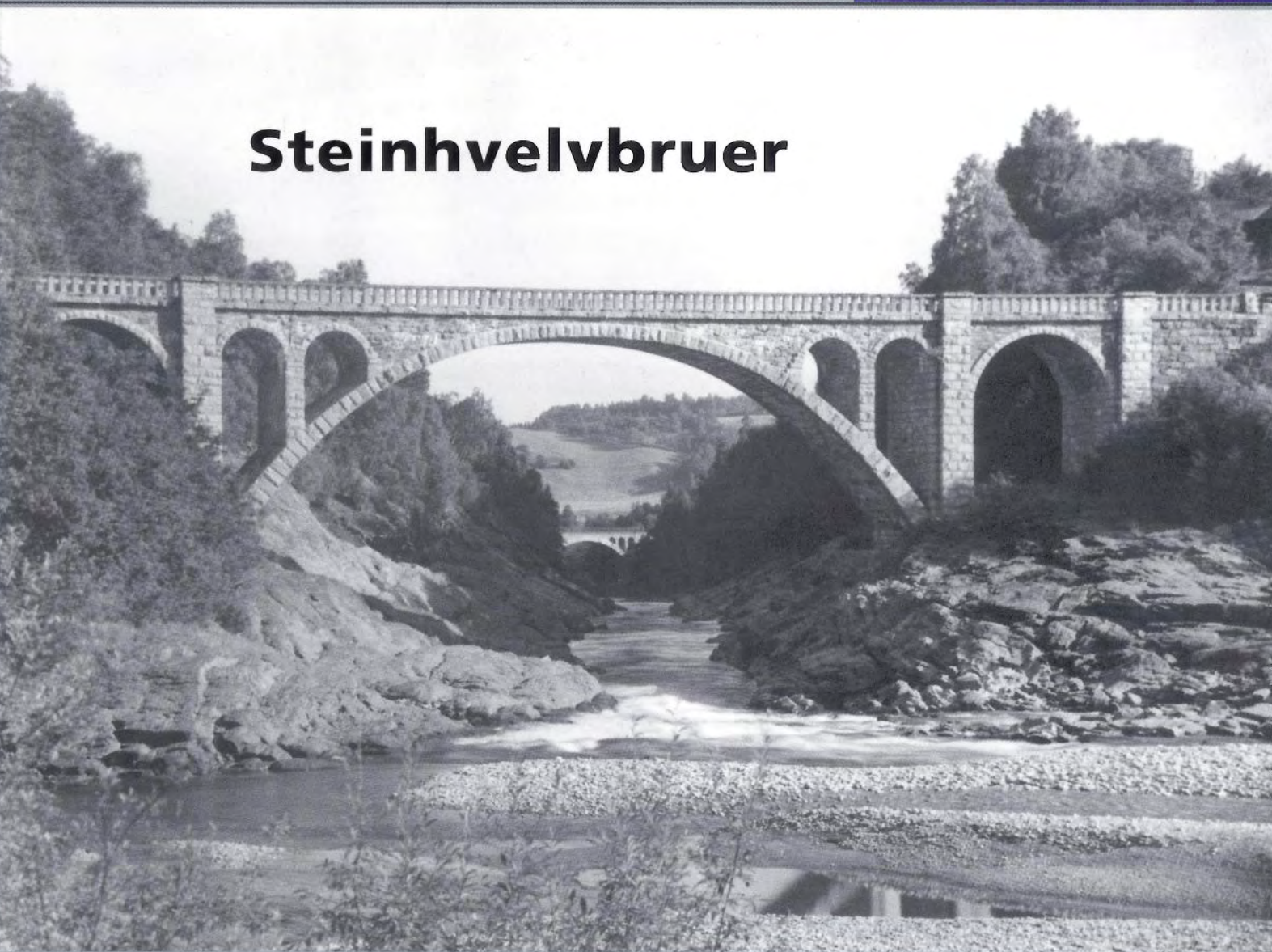




Steinhvelvbruer



Steinhvelvbruer

Desember 2002



Håndbøker i Statens vegvesen

Dette er ei håndbok i vegvesenets håndbokserie – en samling fortløpende nummererte publikasjoner som først og fremst er beregnet for bruk innen etaten.

Håndbøkene kan kjøpes av interesserte utenfor Statens vegvesen til de priser som er oppgitt i håndbokoversikten – håndbok 022.

Det er Vegdirektoratet som har hovedansvaret for utarbeidelse og ajourføring av håndbøkene.

Ansvar for grafisk tilrettelegging og produksjon har Grafisk senter i Vegdirektoratet.

Vegvesenets håndbøker utgis på 2 nivåer:

Nivå 1 - Rød farge på omslaget-omfatter forskrifter, normaler og retningslinj godkjent av overordnet myndighet eller av Vegdirektoratet etter fullmakt.

Nivå 2 - Blå farge på omslaget-omfatter veiledninger, lærebøker og vegdata godkjent av den avdeling som har fått fullmakt til dette i Vegdirektoratet.

Steinhvelvbruer

Nr. 230 i Vegvesenets håndbokserie

Forsidefoto: Gulfoss bruer (vegbrua nærmest, jernbanebrua bak), Hovin i Sør-Trøndelag

Foto: Jernbaneverket

Omslagsfoto: Plassering av stein for buen på Jora bru, Raumabanen. Foto: Norsk Jernbanemuseum

Opplag: 2.000

Trykk: Trykkpartner A/S

ISBN 82-7207-522-9

Innhold

1 INNLEDNING	5
1.1 Bakgrunn og målsetning	5
1.2 Steinhvelv-terminologi	6
2 ARVEN FRA PIONERENE	7
2.1 Historien	7
2.2 Konstruksjonsberegninger	15
2.3 Steinproduksjon	18
2.4 Utforming og byggemetoder	20
3 STEINHVELV FOR NYE ÅRHUNDRE	27
3.1 Konstruksjonsberegninger	27
3.2 Steinproduksjon	35
3.3 Utforming og byggemetoder	39
3.4 Drift og vedlikehold, forsterkning og ombygging	49
3.5 Betong-stenhvelv	52
3.6 Økonomi	53
4 RENESSANSE	55

VEDLEGG A: ORDFORKLARINGER

VEDLEGG B: LITTERATURLISTE

1 Innledning

1.1 Bakgrunn og målsetning

Det er flere hundre år siden nordmenn begynte å bygge steinhvelv i kirker og bruer, og de gamle steinhvelvbruene er blant våre vakreste byggverk. Fra slutten av 1800-tallet og noen tiår framover ble det bygget mange stolte veg- og jernbanebruer, før betong og stål overtok som byggemateriale.

Ildsjeler blant annet i Statens vegvesen og Jernbaneverket har i mange år diskutert om det kunne tenkes en renessanse for denne brutypen og hvor lønnsom den kunne være i dag. Følgende arbeidsgruppe ble i 1997 etablert for å se nærmere på mulighetene: Per H Berg, Olav Grindland og Vidar Veum fra Statens vegvesen Vegdirektoratet; Hilmar Selseng fra Statens vegvesen Rogaland; Arnljot Bergsås, Oddbjørn Jorde, og Håvard Johansen fra Jernbaneveket Ingeniørtjenesten (nå BanePartner); Eldgrim Ødemodland og Torstein Wåle fra Veidekke ASA og Kurt Sandman fra Skifer & Naturstein (nå en del av NCC Industri). Grunnlagsmateriale ble samlet og diskutert, og det ble etter hvert besluttet å lage ei håndbok for steinhvelvbruer.

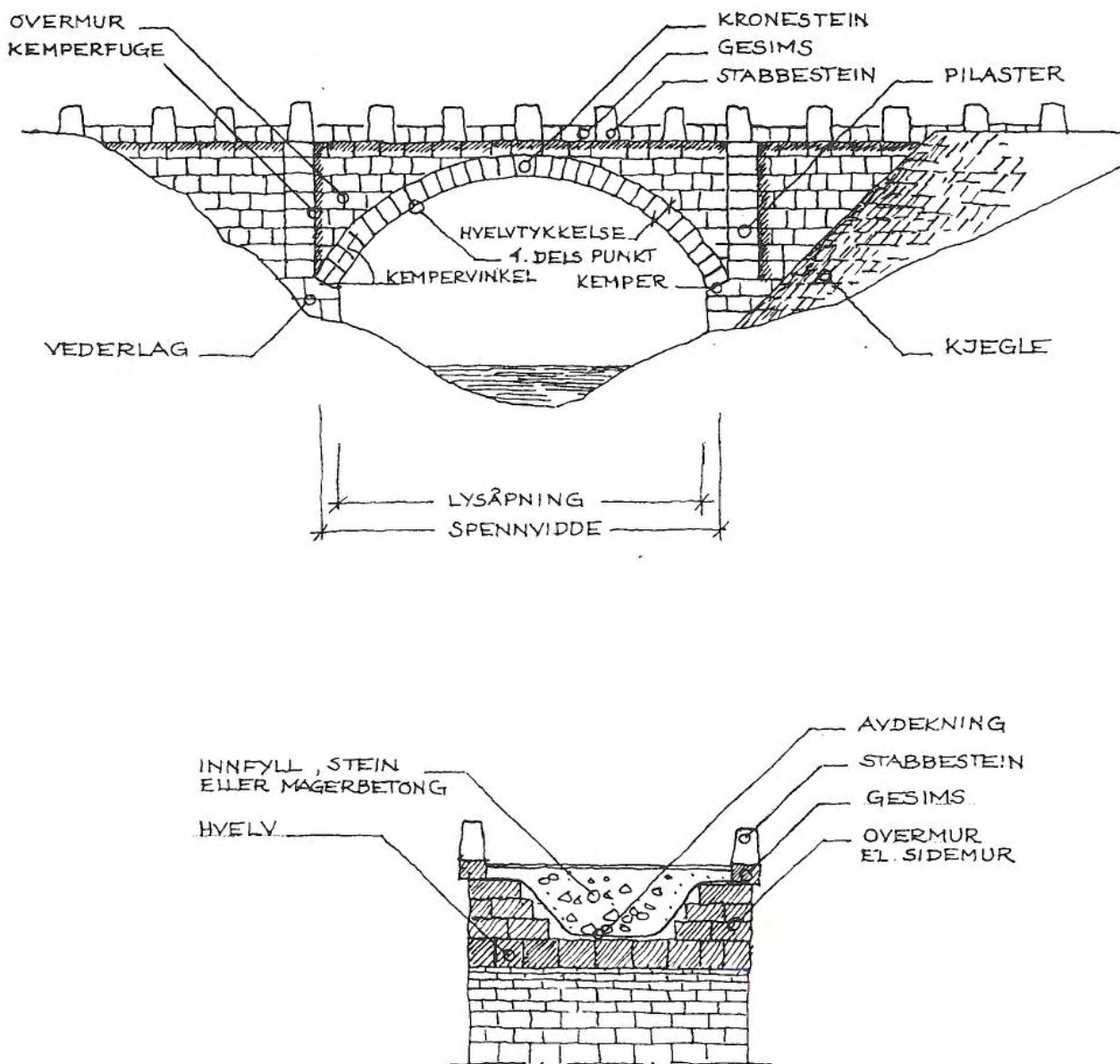
Bokas første hoveddel er en gjennomgang av beregning og bygging av steinhvelvbruer i Statens vegvesen og NSB/Jernbaneverket fram til 2. verdenskrig. Deretter omtales moderne metoder for beregninger, steinproduksjon, bygging og vedlikehold, samt noen viktige økonomiske aspekter. Steinhvelvenes konkurransedyktighet oppsummeres til slutt. Stoffet er redigert av Håvard Johansen, og Rolf H. Gulbrandsen har tegnet skissene.

Høsten 1999 åpnet Åros bru i Sogndalsstrand i Rogaland (se bilder side 48 og 54). Dette var den første steinhvelvbrua som ble bygget i Norge på omkring 60 år, ei flott bru der gamle tradisjoner ble forenet med moderne verktøy og produksjonsteknikk. Den har vekket interessen for steinhvelv i mange miljøer.

Ønsket ved utgivelsen av denne veiledningen er at myndigheter, konsulenter, entreprenører og leverandører skal få inspirasjon og gode ideer som igjen kan bringe steinhvelv på banen innen norsk brubygging.

1.2 Steinhvelv-terminologi

Brubyggingsfaget har, også når det gjelder steinhvelvbruene, sine vel innarbeidede fagbegreper. Siden linjene i dette heftet er trukket bakover i historien støter vi på mange spesielle ord og uttrykk som ikke lenger er i daglig bruk. Noen av begrepene er vist i Figur 1 nedenfor. I vedlegg A finnes dessuten ei fylldig liste med ordforklaringer.



Figur 1. Oppriss og tverrsnitt av ei steinhvelvbru med noen vanlige begreper.

2 Arven fra pionerene

Siste halvdel av 1800-tallet omtales som *Pionertiden* i norsk jernbanebygging, og de første store steinhvelvbruene i Norges statsbaner ble bygget på denne tida. Mange av de mer enn 100 år gamle bruene - både for veg og jernbane - lever i beste velgående enda, og dette er en verdifull kulturarv fra de gamle pionerene.

2.1 Historien

I gammel tid krysset man elvene på klopp, store steiner som var lagt utover og som passet å gå på. Der elva var dypere ble stokker eller heller lagt over som de første primitive bruer. Med steinhvelvbruene startet en ny epoke innen norsk brubygging, og en håndverkstradisjon rundt utvinning og bearbeiding av stein og muring av bruhvelv vokste fram. Akkurat når hvelvkonstruksjoner først ble benyttet ved brubygging i Norge vet man ikke eksakt. Gamle Kongsbergveg, Norges første kjøreveg, anlagt under Christian IV i årene 1624-27 inneholdt muligens ei steinhvelvbru. Brua som står på det aktuelle stedet i dag, den fredede Smedbrua med et spenn på rundt åtte meter, ble lenge antatt å skrive seg fra denne tiden, men nyere gransking av arkivmateriale fra sølvverket i Kongsberg viser at brua ble bygd i 1767.



*Smedbrua, Gamle Kongsbergvei, Buskerud
Bygget 1767. Fredet. Foto: Statens vegvesen*



Hellebru. Foto: Norsk vegmuseum

Vegbruer

Selv om steinhvelvbruene i det offentlige vegnett i dag tilsvarer i underkant av to prosent av det totale antall bruer, utgjør de hovedtyngden av de bevarte bruene fra eldre tider. Dette må tilskrives en kombinasjon av håndverksmessig kvalitet og steinmaterialets bestandighet. I Tabell 1 finnes de 20 eldste hvelvbruene som hittil er registrert i det offentlige vegnett. Lista er ufullstendig da en rekke av de eldste eksisterende bruene ligger utenfor dette vegnettet og vil først bli registrert i forbindelse med «nasjonal verneplan for vegger, bruer og vegrelaterte kulturminner».

Brunavn	Fylke	År	Spennvidde m
Svanes	Rogaland	1700	3,5
Smedbrua	Buskerud	1767	8,0
Spenningsby	Akershus	1804	
Eidsvold Verk	Akershus	1810	
Rise	Akershus	1828	
Lunde	Oppland	1829	20,0
Helvetesbroen	Aust-Agder	1837	
Hårr	Rogaland	1838	
Skårs	Rogaland	1840	3,5
Brekke	Rogaland	1840	
Sagåna gml	Rogaland	1840	
Ise	ÿ stfold	1842	
Sokkatjø	Rogaland	1842	3x4,0
Ogna gml	Rogaland	1842	2x3,5
Svalestad gml	Rogaland	1843	
Hølland	Rogaland	1843	3x8,0
Bakkekleiva	Vest-Agder	1844	
Moi	Rogaland	1844	15,0
Tronvik østre	Rogaland	1844	4,5
Tronvik vestre	Rogaland	1844	4,5

Tabell 1. De 20 eldste steinhvelvbruene i det offentlige vegnettet.



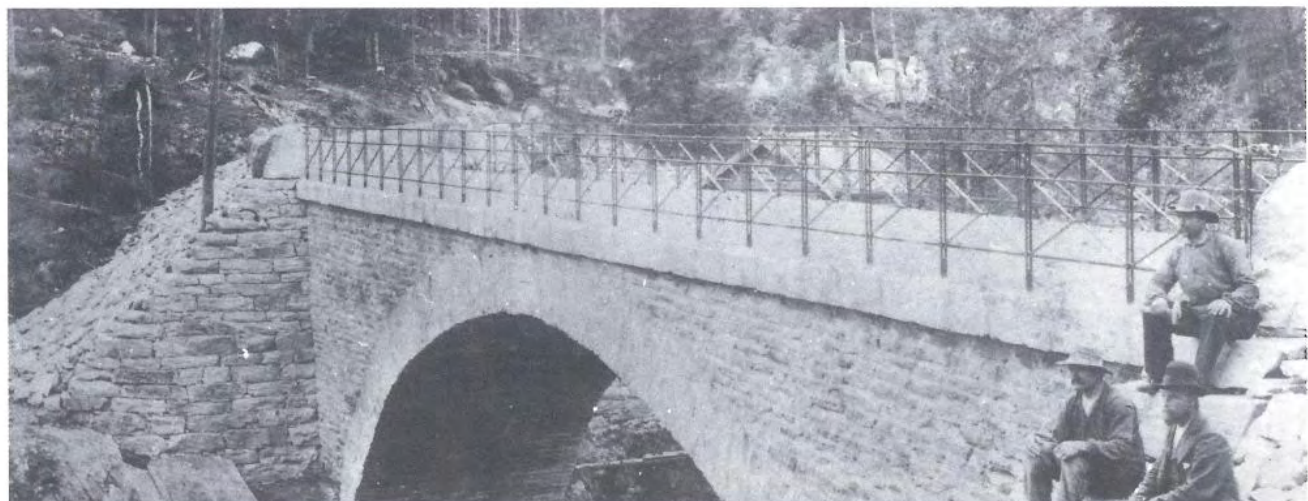
Bergan bru, Roros i Sør-Trøndelag. Foto: Arnljot Bergsås



Lunde bru på Den Bergenske Kongeveg i Etnedal i Oppland, med spennvidde 20 meter. Bygget 1827-29. Brua er stadig trafikkert og er Norges lengste ett-spenns hvelv i tørrmur. Fredet. Foto: Rolf H Gulbrandsen



Hølland bru på den vestlandske hovedvei i Ogne, Stavanger amt, med lengde 33 meter. Bygget i 1843. Brua ble opprinnelig tørrmurt med tilpasset stein, men ble sementert i fugene i 1901 og 1919. Foto: Norsk vegmuseum



Sporran bru i Numedal, med spennvidde 26 meter. Bygget i 1900. Foto: Statens vegvesen, Vegdirektoratet

Begynnelsen av 1900-tallet var ei storhetstid for steinhvelvbruer. Som et eksempel må nevnes den imponerende Skodjestraumbrua i Møre og Romsdal. Hovedspennet er 59 meter, det lengste spenn for steinbruer i det norske vegnettet. Den er også spesiell fordi den kombinerer bruk av hogget stein og teglstein i ulike konstruksjonsdeler.

Steinhvelvbruene fikk en forholdsvis brå avslutning rundt 1930, da blant annet betongkonstruksjoner raskt revolusjonerte norsk brubyggingspraksis.

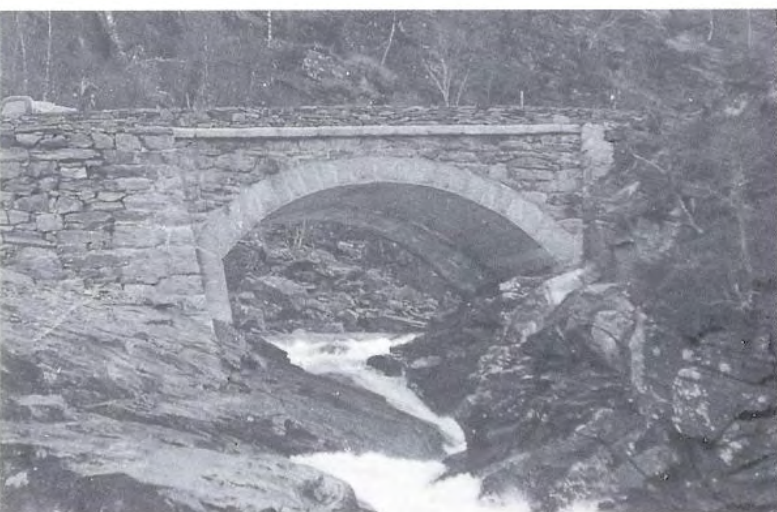
Det finnes for tiden ingen komplett oversikt over alle steinhvelvbruer i Norge. Dagens bruregister, Brutus, omfatter alle bruer i riks- og fylkesvegnettet og deler av kommunalvegnettet, og Brutus inneholder i dag 282 steinhvelvbruer. I Tabell 2 er vist de 20 største steinhvelvbruene ved Statens vegvesen, sortert etter spennvidde. Spennvidder kan være målt på forskjellige måter for de enkelte bruene.



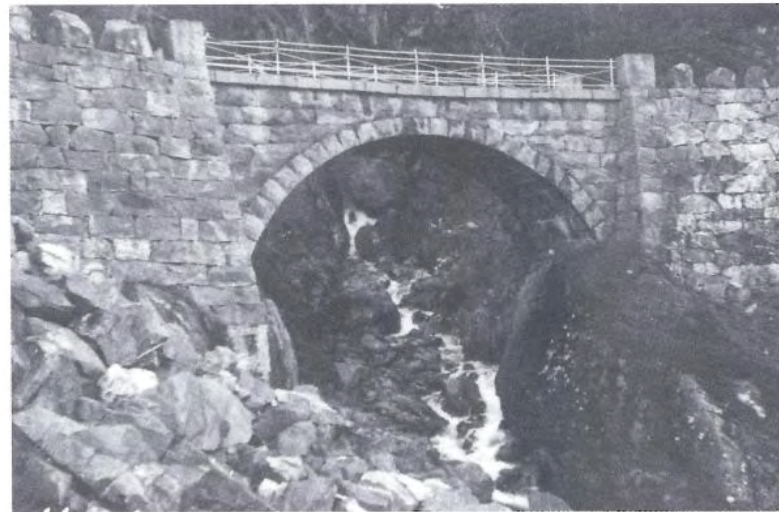
Skodjestraumen bru i Møre og Romsdal, med spennvidde 59 meter. Bygget 1911- 22. Fredet. Foto: Statens vegvesen Møre og Romsdal.

Brunavn	Fylke	År	Lengste spenn m	Ant.spenn
Skodjestraumbrua	Møre og Romsdal	1922	59	3
Tveitsund	Telemark	1918	50	1
Åmfoss	Aust-Agder	1914	41	2
Gulfoss	Sør-Trøndelag	1922	40	3
Eggjestraumbru	Møre og Romsdal	1918	40	1
Merk	Sør-Trøndelag	1899	31	1
Lier	Buskerud	1913	30	1
Klosterfoss	Telemark	1903	30	1
Foss	Buskerud	1915	28	1
Folset	Telemark	1902	27	1
Jori	Oppland	1941 ¹⁾	25	1
Ulstad	Oppland	1935	25	1
Faslefoss	Oppland	1941 ²⁾	25	1
Hofta	Oppland	1934	24	1
Kjellbrua	Sør-Trøndelag	1924	24	1
Haug	Telemark	1948	21	1
Krike	Møre og Romsdal	1927	21	1
Vrålisoen	Telemark	1928	20	1
Lunde	Oppland	1829	20	1
Fora	Sør-Trøndelag	1922	20	1

Tabell 2. De største steinhvelvbrueene i det offentlige vegnett. 1) Sprengt 1940, gjenoppbygd 1941. Opprinnelig steinhvelv, 1852-1940, hadde en spennvidde på ca 15 m. 2) Sprengt 1940, gjenoppbygd 1941.



Verka bru, Samnanger i Hordaland. Bygget ca. 1900. Utvidet og forsterket i 1943. Foto: Statens vegvesen.



Hestagjel bru, Ullensvang i Hordaland. Bygget ca. 1925. Utvidet i 1943. Foto: Statens vegvesen.

Jernbanebruer

Innledningen til perioden med steinhvelvbruer i Norges statsbaner tidfestes til 1882, med fullførelsen av den første hvelvbru på "Greveskabernes Jernbane", nåværende Vestfoldbanen, over ei bukt i Farrisvannet ved Larvik. Hvelvet ble utført av bearbeidet bruddstein i sementmørtel og hadde 9,4 meter lysåpning. NSB's brukontor ble opprettet i 1891, og på denne tiden ble bruer av trevirke erstattet med nye bruer av stål og stein. Med "Belastningstoget av 1899" var grunnlaget lagt for beregning av alle nye bruer.

Perioden fra 1890-årene og til og med andre verdenskrig omtales som *Den storstilte utbyggingen*, og det er også i denne perioden byggingen av steinhvelvbruer ved Norges statsbaner var virkelig storstilt. De største og vakreste steinhvelvbruene finnes på Dovrebanen og Raumabanen. Orkla bru på Dovrebanen (1916), er med lysåpning på 60 meter den største i Norge og stor også i europeisk målestokk. Den er sannsynligvis også den best dokumenterte steinhvelvbrua i Norge. Jora bru (1918) er den største steinhvelvbrua på Raumabanen med spennvidde 54 meter. Kylling bru (1923) er derimot hyppigst fotografert og gjengitt i mange bøker og reisebrosjyrer og til og med på et norsk frimerke.

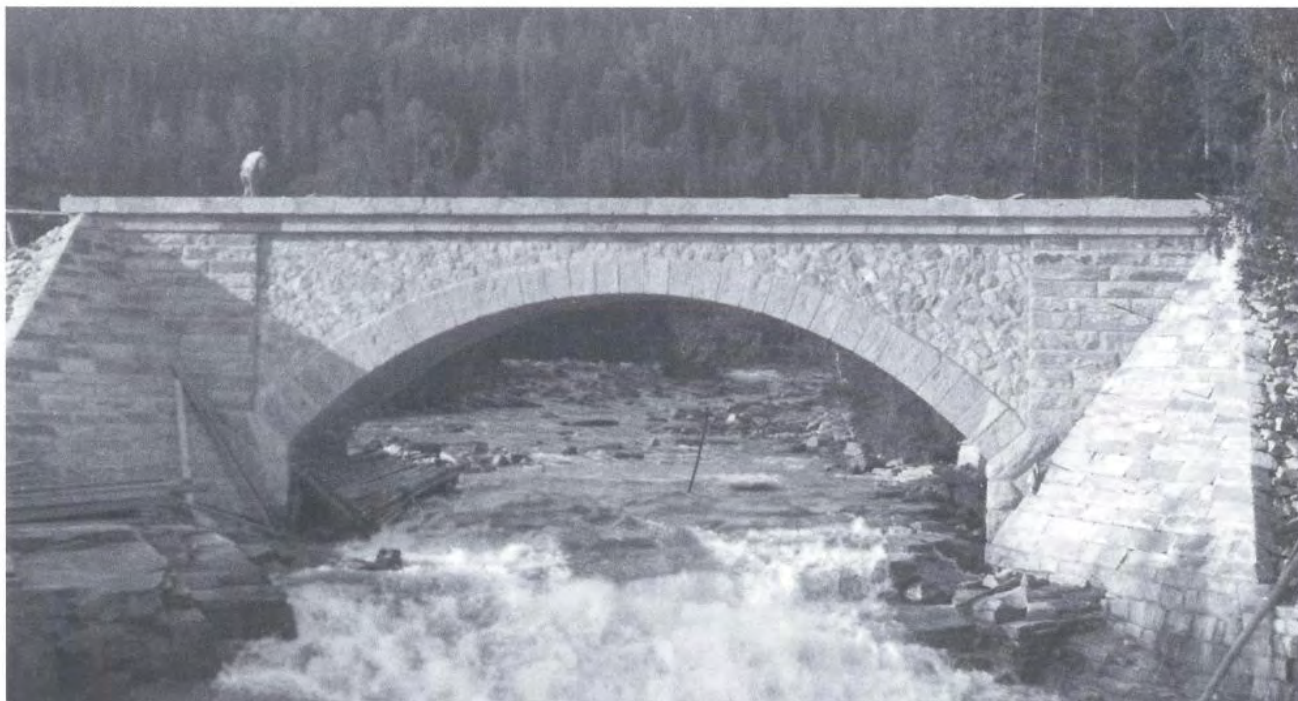
Tabell 3 viser en oversikt over de største steinhvelvbruer bygget ved Norges statsbaner, ordnet etter spennvidder.



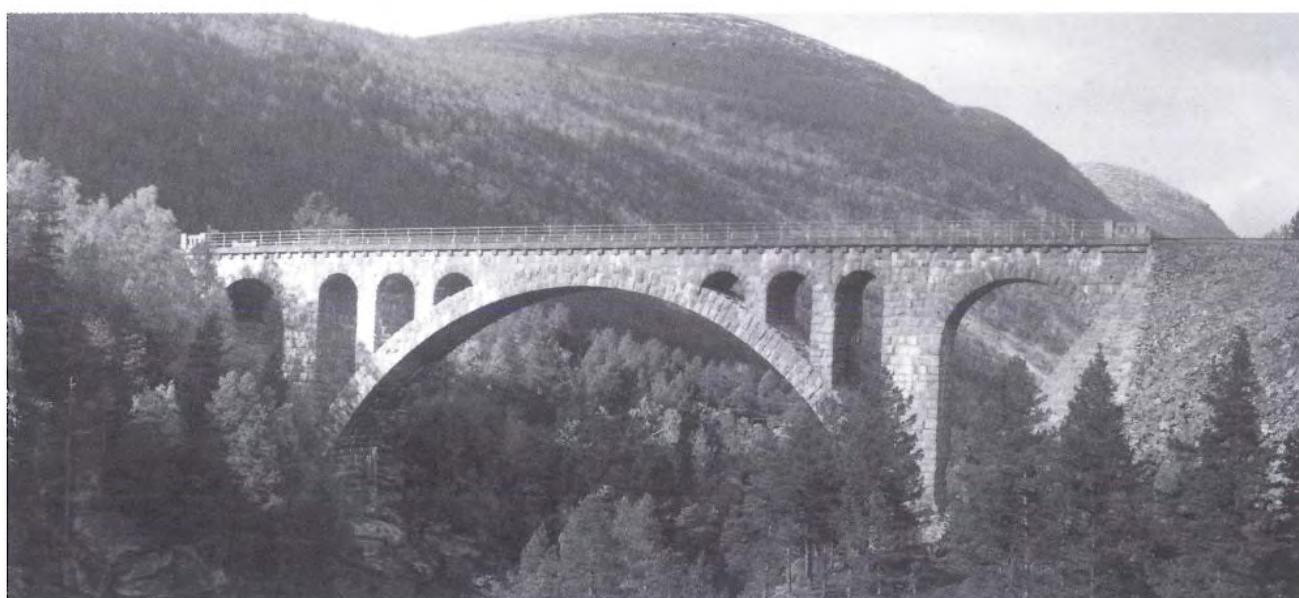
Stuguflåten bru på Raumabanen (1922). Reparasjoner etter skader fra sprengningsforsøk i 1944 synlig. Foto: SCANPIX/Stein J Bjørge.

Navn	Banestrekning	År	Lysåpning
Orkla bru	Dovrebanen	1916	60
Jora bru	Raumabanen	1918	54
Gulfossen	Størenbanen	1918	46
Svenkerud bru ¹⁾	Bergensbanen	1907	44
Kylling bru	Raumabanen	1923	42
Kjeosen bru	Sørlandsbanen	1927	42
Strandeelva	Bergensbanen	1904	41
Skjærdalen	Randsfjordbanen	1924	40
Bøylefoss	Arendalslinjen	1910	40
Høgefoss bru ²⁾	Nelaug-Treungen	1913	37
Kolsetelven	Sørlandsbanen	1917	35
Hengselva	Sørlandsbanen	1917	35
Kammerfoss	Kragerølinjen	1926	33
Stuguflåten	Raumabanen	1922	30
Lierelva ³⁾	Drammensbanen	1913	30
Moldåa bru	Bergensbanen	1900	30
Lysakerelva	Drammensbanen	1913	23
Begna	Roa-Hønefosslinjen	1909	21

Tabell 3. De 18 største steinhvelvbruene ved Norges statsbaner. 1) Bru over Hallingdalselva ved Svenkerud på Bergensbanen med 44 meter spennvidde ble sprengt i 1940 og erstattet av et hvelv i armert betong i 1941. 2) Høgefoss bru ble ved nedleggelsen av strekningen Simonstad - Treungen i 1967 sammen med banelegemet overtatt av Telemark fylke som kompensasjonsvei. 3) Bru over Lierelven på Drammenbanen ble ved nedleggelsen av strekningen Spikkestad - Drammen i 1973 sammen med jernbaneparsellen overtatt av Lier kommune og ombygd til vegbru.



Storvasselva bru på Nordlandsbanen (1935), med spennvidde 15 meter. Foto: Jernbaneverket.



Kylling bru på Raumabanen under bygging – og ferdig 1923. Hovedspenn 42 meter. Foto: Jernbaneverket

2.2 Konstruksjonsberegninger

Det var tidlig kjent at stein som byggemateriale egnet seg dårlig i konstruksjoner der det kunne bli utsatt for strekk- og bøyepåkjenninger. Det var imidlertid neppe utviklet pålitelige beregningsmetoder for de Norske buekonstruksjonene vi kjenner til fra middelalderen. Man hadde sannsynligvis opparbeidet seg nødvendig kunnskap gjennom utenlandsk byggeskikk, som i hovedsak var basert på prøving og feiling. En finner ikke eksempler på hvelvkonstruksjoner anvendt i brubygging i Norge før på slutten av 1600-tallet, og beregningsmetodene var mer basert på erfaring og tradisjoner enn teoretiske kunnskaper. Det var først rundt ca. 1700 at *trykklinje-teorien* ble utredet av ledende matematikere på kontinentet, slik at det etter hvert ble mulig å konstruere den best mulige buform ut i fra parametre som spennvidde, egenlast ved kemper og buetopp, pilhøyde, buetykkelse og nytelast.

Statistiske beregninger av hvelvbuen

For fast innspente hvelv (uten ledd) er beregning av opplagerkrefter en statisk ubestemt oppgave. Angrepspunktene for trykkresultantene i kemper på begge sider og i krona (toppen av buen) ble da antatt, hvelvet analysert som en statisk bestemt treledds bue og opplagerkreftene ble funnet. Følgende angrepspunkter ble valgt for trykklinjen for tre uavhengige beregninger:

1. Øvre 1/3-punkt i topp og nedre 1/3-punkt ved kemper
2. Nedre 1/3-punkt i topp og øvre 1/3-punkt ved kemper
3. Midtpunktene i topp og ved kemper

For selve buen gjaldt det å sørge for at aksialkraft og bøyemoment for alle snitt var slik at en unngikk strekkspenninger i tverrsnittet. Dette kunne bare oppnås ved at *trykkresultanten* befant seg innenfor kjernetverrsnittet, den midterste tredjedelen av det rektangulære hvelvsnittet. I tillegg måtte trykkpåkjenninger kontrolleres mot materialets styrke.

Den optimale hvelvformen ble utledet ved først å finne den form der trykklinjen for egenvekt og halv mobillast jevnt fordelt over hele hvelvet følger hvelvets midtlinje. Underkant av hvelvbuen ble foreløpig antatt å følge en sirkelbue der hvelvtykkelsen i toppen, d_t , ofte ble valgt ut i fra erfaring. Empiriske formler benyttet på begynnelsen av 1900-tallet er vist i Figur 2.

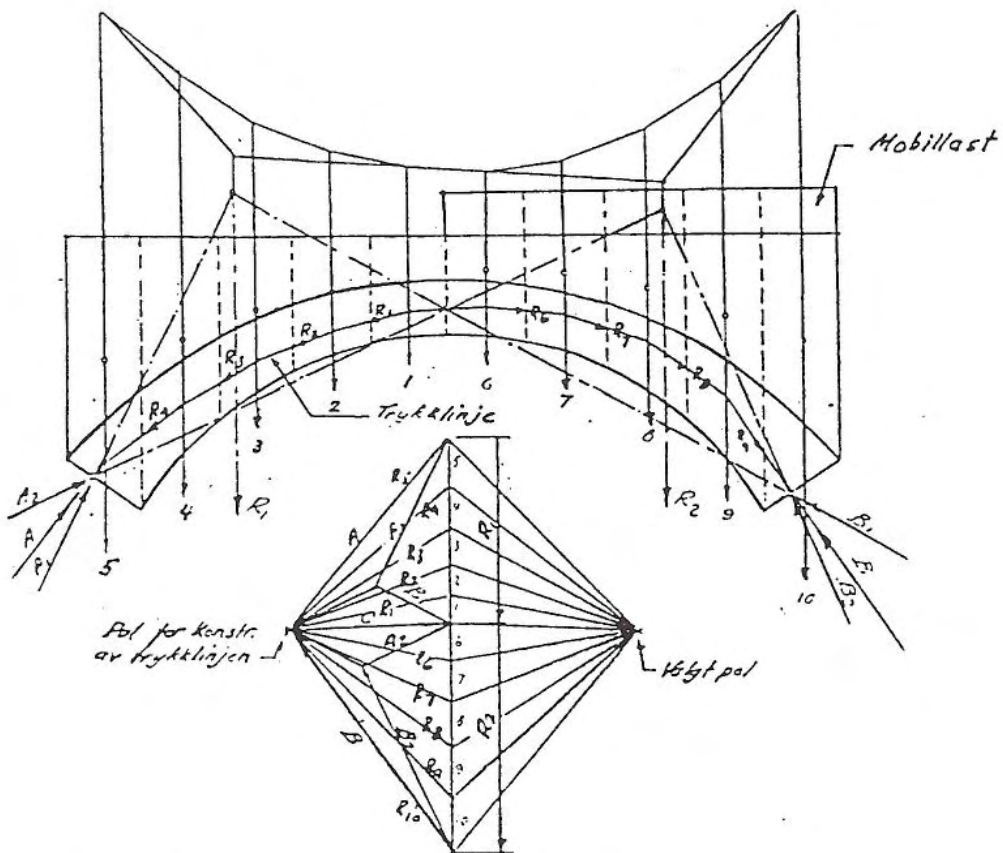
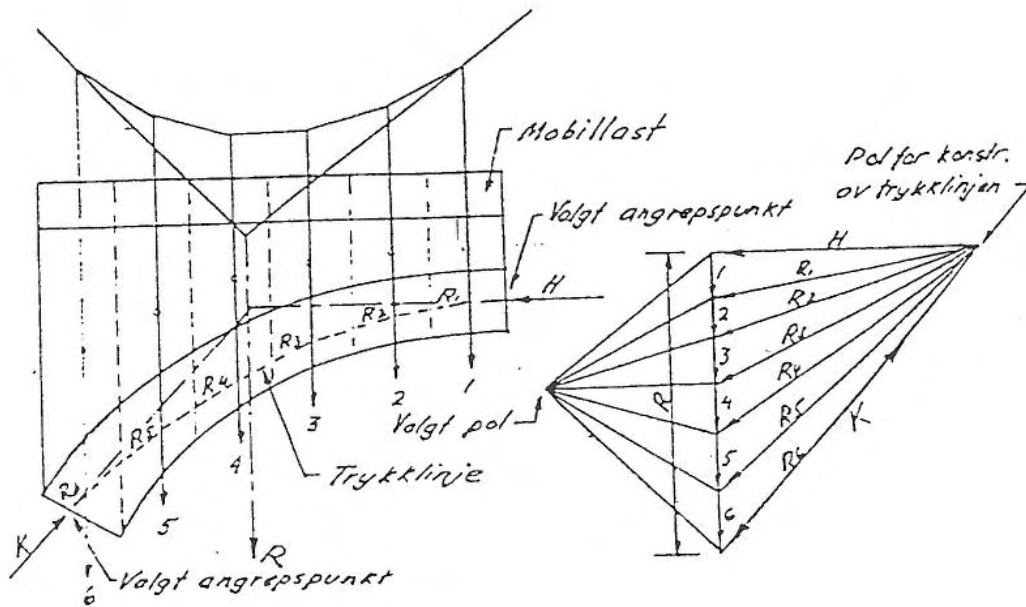
$$\text{For jernbanebruer} \quad d_t = 1,4 \left[\frac{L+R}{100} + 30 \right] \text{ cm}$$

$$\text{For vegbruer} \quad d_t = \left[\frac{L+R}{100} + 15 \right] \text{ cm}$$

der L = spennvidde (cm) og R = hvelvaksens radius (cm)

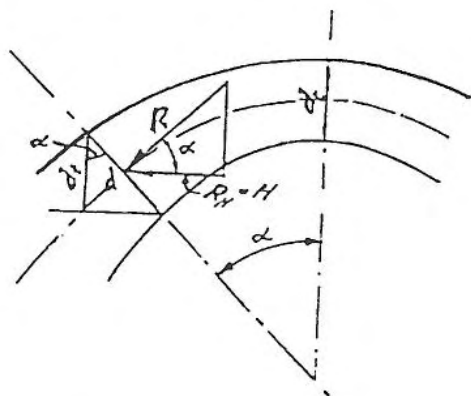
Figur 2. Empiriske formler for hvelvtykkelsen i krona (toppen av buen).

Hvelvets snittkrefter ble gjerne beregnet grafisk når trykkresultantens størrelse, retning og plassering i tverrsnittet var kjent (se for eksempel Figur 3).



Figur 3. Kraftdiagram for symmetrisk og usymmetrisk belastning.

For de øvrige hvelvsnittene ble hvelvtykkelsen valgt slik at vertikalprojeksjonen av hvelvtykkelsen ble like stor for alle snitt; $d = d_t / \cos\alpha$, der α er vinkelen som buens senterlinje i det betraktede snitt danner med horisontalen (se Figur 4). Ved å velge en buetykkelse som varierer i henhold til dette kriteriet vil den gjennomsnittlige spenning i buen bli like stor i alle snitt. Hvelvformen ble deretter korrigert slik at hvelvets midtlinje svarte til trykklinjen.



Figur 4. Buens tykkelse.

Til slutt ble hvelvet kontrollert for følgende belastningstilfeller:

1. Hvelvets egenvekt alene
2. Egenvekt + trafikklaster over hele hvelvet
3. Egenvekt + trafikklaster over den ene hvelvhalvdelen

Lastforskrifter og prosjekteringsregler

På slutten av 1880-tallet og fram til 1912 ble steinhvelvene i vegnettet vanligvis dimensjonert for jevnt fordelte laster på 300-500 kg/m², alternativt for 2-3 tonn aksellaster uten dynamisk tillegg. Ved lastforskriftene av 1912 og 1920 ble aksellastene økt til 3,5 eller unntaksvis 10 tonn. For jernbanebruer ligger *Lasttog 1899* og *Bestemmelser for beregning av nye stenbroer ved Statsbanene* til grunn for mye av det prosjekteringsarbeidet som ble utført.

Det ble i *Meddelelser fra Veidirektøren* (1915) vist nomogram som gjorde det mulig for ulike aksellaster å beregne de nødvendige hvelvdimensjoner, overmurshøyder og pillhøyder ved forskjellige spennvidder. Tilsvarende nomogram er også blitt utarbeidet for beregning av brukslaster, se blant annet *Lettvint klassifisering av steinhvelv* i Norsk Vegtidsskrift 1967. Det er også utarbeidet formler og tabeller som letter regnearbeidet ved analytisk beregning etter elastisitetsterorien.

2.3 Steinproduksjon

Da våre store steinhvelvbruer ble bygget på begynnelsen av 1900-tallet ble det lagt stor vekt på steinmaterialets kvalitet, og gneis var et ettertraktet byggemateriale. Det var ingen selvfølge å kunne dekke hele behovet for steinmateriale fra ett enkelt steinbrudd, så det ble brukt forskjellig steinkvalitet på forskjellige steder i konstruksjonen. Steinens brukbarhet som bygningsmateriale, dens mineral-sammensetning, værbestandighet osv ble derfor undersøkt av en geolog. Steinens bruddstyrke ble bestemt ved trykkprøver både i lufttørret og vannmettet tilstand, og de tillatte påkjenninger i hvelvmur var avhengig av byggemåten og anvendelsen av steinmaterialet. Tillatte trykkspenninger ble før første verdenskrig i alminnelighet satt til 1,5 N/mm² for bruer med spennvidder inntil 15 meter og 4,0 N/mm² for bruer med lengre spennvidder. Strekkspenninger ble ikke akseptert. Mye av den detaljerte informasjonen om steinhvelvbruenes materialegenskaper er gått tapt, men i Tabell 4 følger en tabell over noen jernbanebruer med kjente steinkvaliteter i hvelvet.

Brunavn og fylke	Steinbrudd	Steintype	Trykkfasthet N/mm ²
Bru over Kammerfoss Aust-Agder	Strand steinbrudd	Grå gneisgranitt	180
Orkla bru Sør-Trøndelag	Tosetbruddet, Skavlibruddet og tre andre brudd	Grovkornet biotitgranitt og hvit granitt	140-170
Svenkerud bru Buskerud	Steinur ved brustedet	Sandsteinskonglomerat større og mindre kvartsknoller i en urein kvarssandstein	88-152
Bru over Strandeelva Hordaland	Steinbrudd ved Vossabanen	Gneis	159-268 (lufttørret) 100-149 (vannmettet)
Bru over Fossingelva Nord-Trøndelag	Skjelstad brudd	Kalksandstein	85-183
Bru over Gråbræk dam Nord-Trøndelag	Fuldset brudd Huseby brudd	Kalksandsteinskifer	100-120
Bøylefoss bru Aust-Agder	Flere steinbrudd i nærheten		110-173

Tabell 4. Steinkvaliteter for noen bruer.

Dynamitten var kommet, og store blokker ble skutt ut for videre bearbeiding for hånd, enten med enkeltmannsredskap eller ved tomannshugging. Hvilken arbeidsmåte som var den beste var avhengig av steinens beskaffenhet og arbeidernes erfaring. Det beste resultatet ble som regel oppnådd med enmannshugging, der hver mann hadde sin steinblokk å arbeide på.

Det ble stilt funksjonskrav til steinen, som for eksempel at minste lengde skulle være 60 cm og minste *forband* 20 cm (se kap 3.3 og Vedlegg A). Dessuten skulle ingen steins lengde være over 3-4 ganger tykkelsen. Det var store variasjoner i den tilhugde steinens toleranser, og fugestørrelsene kunne variere mellom 1 og 10 cm. Også på begynnelsen av 1900-tallet var det som regel billigere å bruke mer mørtel enn å bearbeide overflatene alt for nøye, og ingeniørene var svært bevisst disse vurderingene.

Det var normalt å tilpasse den tilhugde steinen i steinbruddet og merke steinene før transport til byggeplassen. Dette gjaldt spesielt det første skiftet i steinhvelvbuen. På de senere steinhvelvbruene med store spenn ble steinen tilhugd i steinbruddet ved hjelp av mal. Det ble ofte mye vrakstein under produksjonen, og hvis ikke veien til byggeplassen var for lang ble den gjerne brukt til å bygge *kjegler* eller som fyllmasse inne i brua.



*Fra steinbrudd i Trollstigen.
Foto: Statens vegvesen Møre og
Romsdal.*

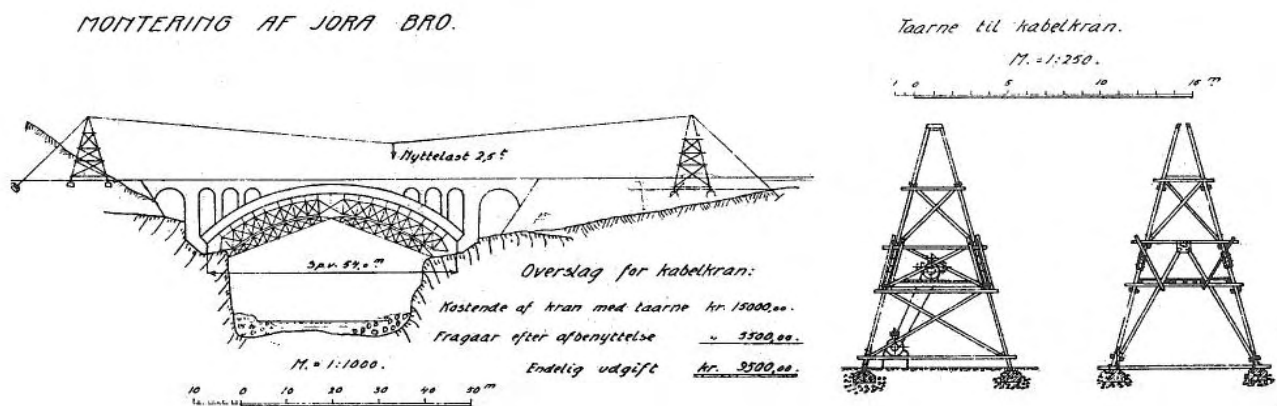
2.4 Utforming og byggemetoder

Transport

Ved bygging av steinhvelvbruer var det vanlig med store transportavstander. For å oppnå steinkvaliteter med tilstrekkelig styrke ble det søkt i nærområdet til byggeplassen og siden lenger unna. Transportlengder på mellom 2 og 10 kilometer var vanlig.

Transporten mellom steinbruddet og byggeplassen foregikk vanligvis med hest og slede om vinteren. Steinen ble noen ganger løftet opp med en anleggsbane til framtidig høyde og mellomlagret under kranbanen eller i nærheten før endelig montasje.

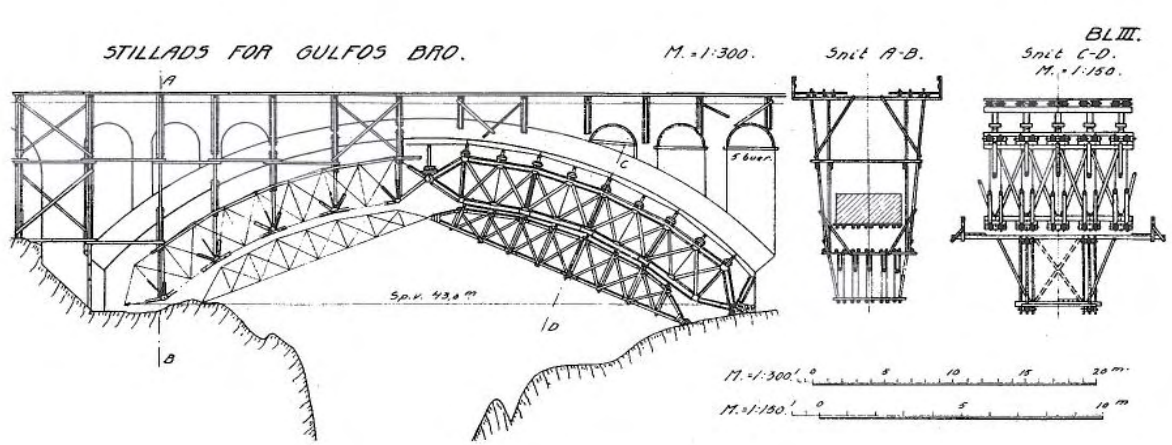
Til transport på byggeplassen kunne det bli brukt en eller to taubaner med en løpekatt som ble trukket til riktig plass med tau eller en elektrisk drevet kabelkran på wire mellom to tårn. Større bruer hadde en trallebane i overkant av arbeidsstillaset og kran for nedfiring av steinen.



Figur 5. Montering av Jora bru med kabelbane. Skisse fra Normaler av 1914.

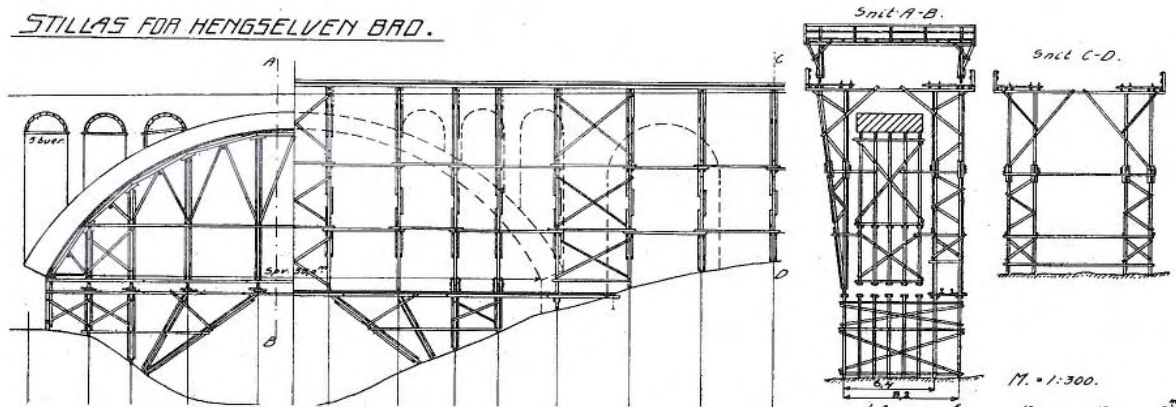
Stillas

Stillasets utforming var situasjonsbestemt. Byggetiden kunne være flere år, og en måtte ta hensyn til is og tømmerfløting i elva. Det var naturlig å dele opp monteringsstillaset i *buestillas* med *understillas* og *overstillas* og *arbeidsstillas* med eventuelt *transportstillas*. Stillaset var av trevirke, og egne tegninger og beregninger ble utført for dem. For de store hvelvene med flere steiner i høyden var det vanlig å dimensjonere stillaset for vekten av den første ringen. Belastningen av de påfølgende ringene ville bli tatt opp av den første etter to ukers herding. Regnskapsoversikter viser at det var restverdi i trevirket som kunne gå til fradrag i byggekostnadene.

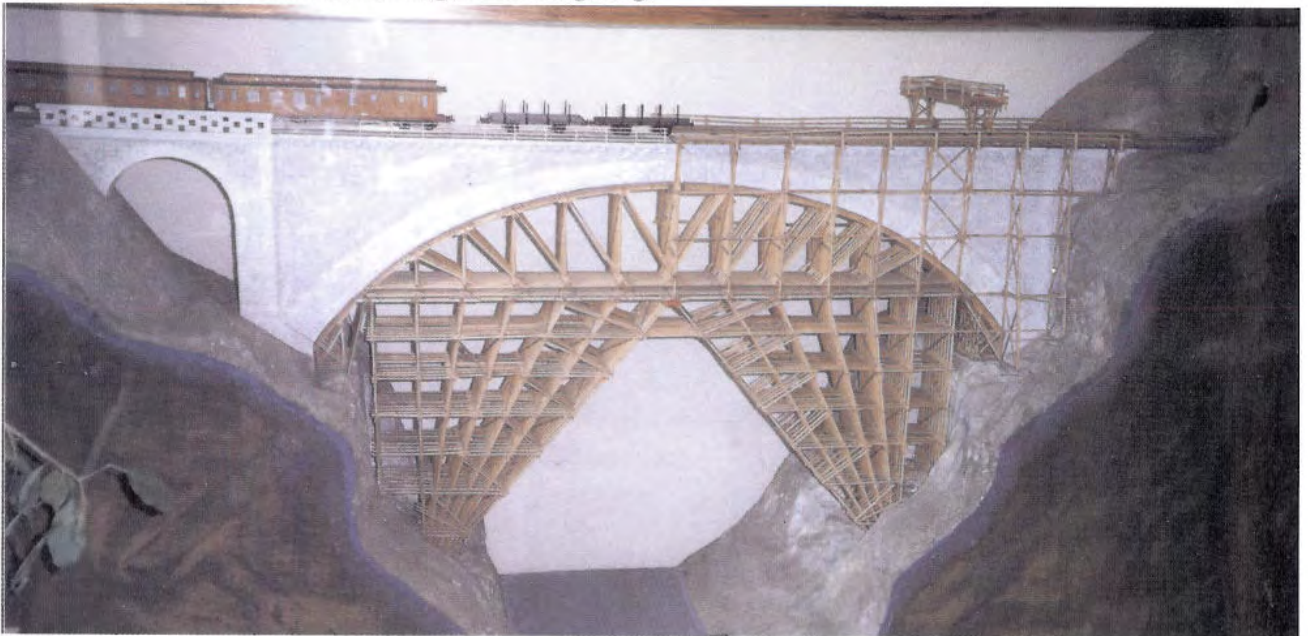


Figur
6

Stillas til jernbanebru ved Gulfoss, Støren i Sør-Trøndelag.



Figur 7. Stillas til jernbanebru ved Hengselven, Kongsberg.



Modell ved NTNU av Orkla bru, bygget 1911-1916, med stillas. Hovedhvelvet har tre steiner over tykkelsen, lysåpning 60,0 meter og pilhøyde 13,7 meter, og tykkelsen er 1,8 meter i krona og 3,3 meter ved kemper. Sidespennet har lysåpning 9,5 meter. Foto: Jernbaneverket/Svein Halvorsen.

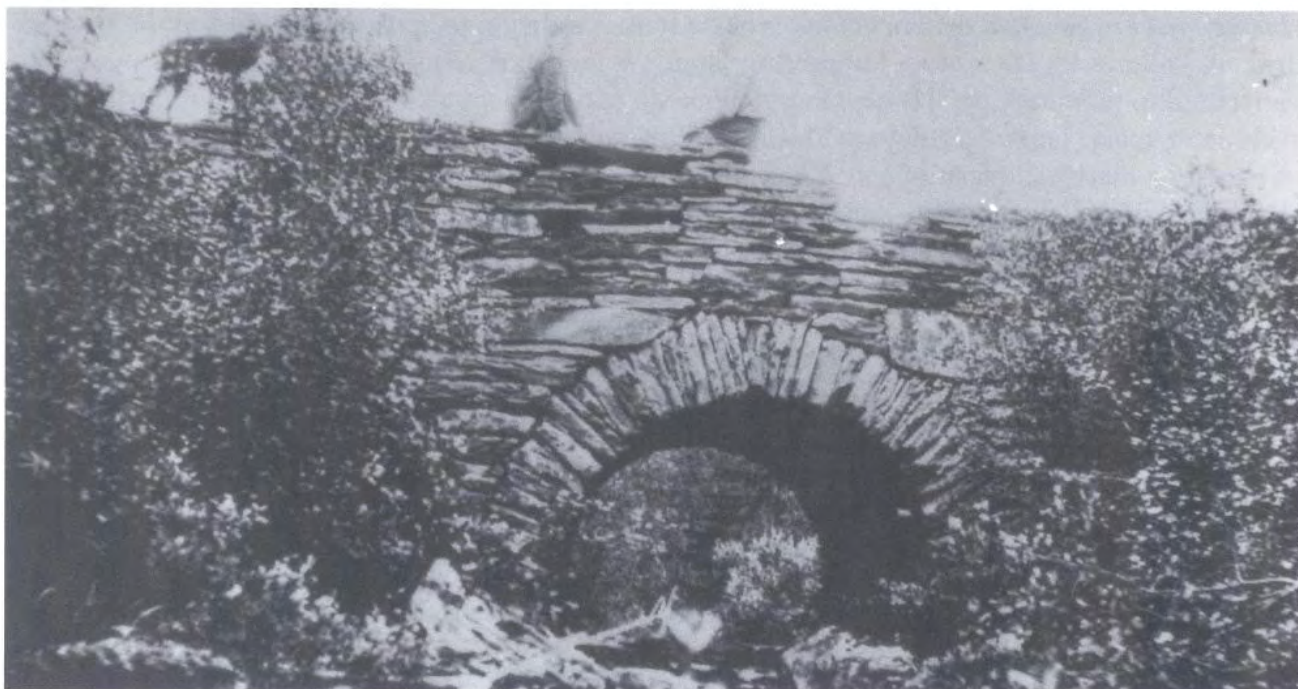
Muring

Det fantes mange måter å mure steinhvelvene på, beskrevet med faguttrykk som er fremmede for oss i dag. Det kunne være begreper som *tørrmur med utvendig fuging*, *tugtet stein lagt i sementmørtel med stein uten særlig tildannelse og i alle tykkelser*, *kvadermur i sementmørtel med noen lunde like store fuger*, *bruddstein i sementmørtel med regelmessige fuger og godt forband*, *cyklopemur* og mange andre. Uttrykkene beskriver først og fremst steinens bearbeidingsgrad og murens fugeløsning. De mer spesielle ordene er forklart i Vedlegg A. Bearbeidingsgrad og fugeløsning ligger også til grunn for hovedinndelingen av muremetodene for norske steinhvelv presentert i dette kapitlet.

Tørrmuring med ubearbeidet naturstein ble anvendt i norske steinhvelvbruer i mange hundre år, fra de eldste veganleggene og fram til 1880-årene. Steinen ble hentet i umiddelbar nærhet og tilpasset etter beste evne. Store steiner ble støttet av mindre steiner (*skorer*) som ble kilet inn i mellomrommene. Selv om overflate av hvelv og murer var svært røffe i sin utførelse og form hadde de den fordel at konstruksjonen drenerte ut alt vann slik at fare for frostsprengning var minimal. Denne byggemåten finner en eksempelvis i bruer på Carl Johans veg, anlagt 1820-35 i Verdal i Nord-Trøndelag, og på Geirangervegen fra 1880-årene. Metoden egnet seg best for spennvidder under 10 meter.



Lunde bru, Oppland. Tørrmurt hvelv med ubearbeidet naturstein. Foto: Per H. Berg.



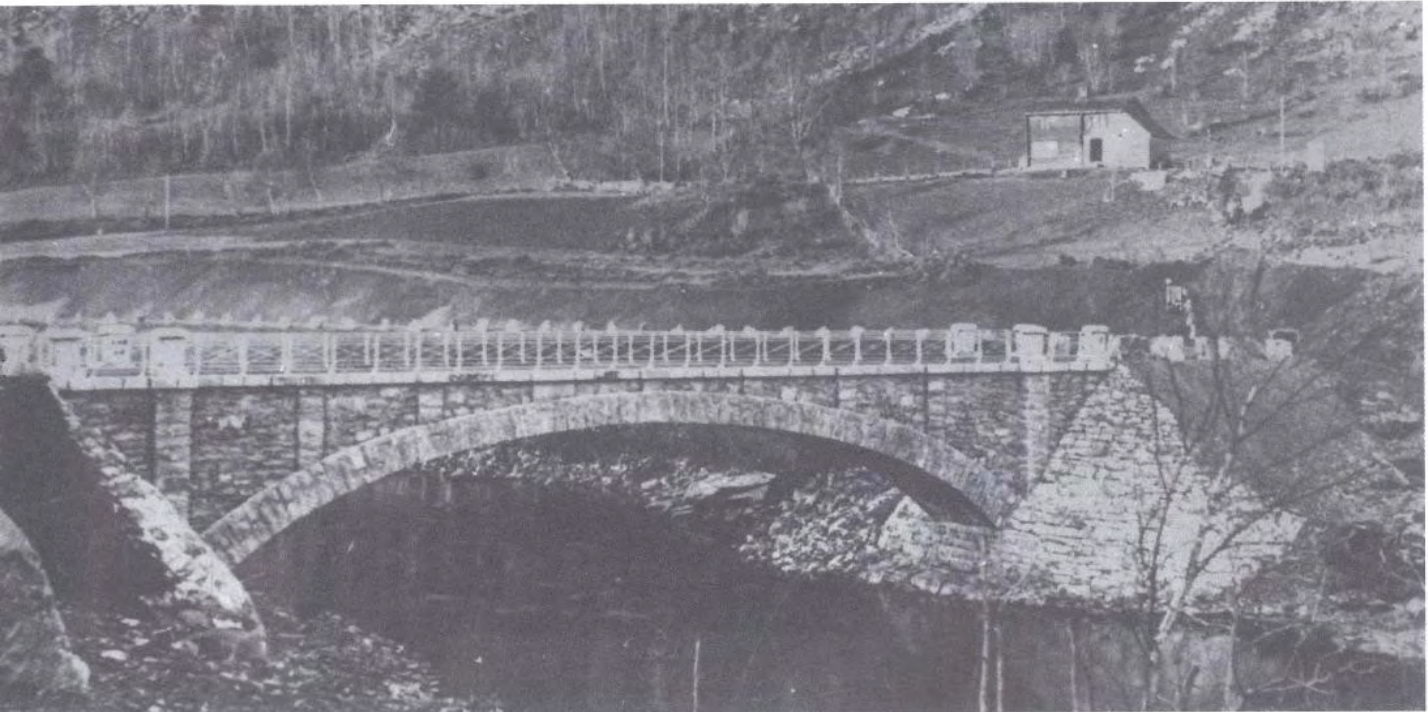
Fra Carl Johans veg, Verdal i Nord-Trøndelag. Tørrmur av ubearbeidet naturstein. Foto: Norsk vegmuseum.

Tørrmuring med hogget stein var vanlig fra omkring 1830 og fram mot 1900. For større hvelv var det nødvendig med mer presis tilpasning mellom steinene for å sikre godt anlegg og bedre trykkutjevning i berøringsflatene. Ved flate buer der trykkreftene var betydelige, var dette spesielt viktig fordi faren for knusning og sprekkdannelser var større. Med denne formen for muring ble det ikke behov for utkiling av hvelvstein med mindre stein slik tilfellet var med ubearbeidet stein. Det var imidlertid viktig at steinen ble lagt i forband slik at en ikke fikk langsgående gjennomgående fuger. Dyktige murere prøvde også å unngå gjennomgående fuger i tverretningen. Steinhvelv av tørrmurer med bearbeidet stein kunne ha spennvidder på opp til 20 meter.



Sandvatnet bru, Tinn i Telemark, bygget 1896. Tørrmuring med hogget stein. Foto: Jan A. Martinsen

Muring med hogget stein og mørtelfuger vokste fram i brubyggingen på begynnelsen av 1800-tallet. Bruk av kalkmørtel har i ulike kulturer og langt tilbake i tida blitt brukt i mange slags byggverk. Mørtelfuging ga perfekt trykkutjevning mellom steinenes anleggsflater og muliggjorde bygging av hvelv med spenn langt over det som hittil hadde vært vanlig. Med de trykksterke sementmørtlene som kom på markedet på slutten av 1800-tallet ble spennvidden øket til bortimot det tredobbelte av de største tørrmurte hvelvene. Denne dramatiske økningen av spennvidden må også delvis tilskrives moderne beregningsmetoder som tillot mer nøyaktig dimensjonering av hvelvtykkelser, og bueform.



Merk bru, Rennebu i Sør-Trøndelag. Bygget 1899. Hogget stein i sementmørtel. Foto: Statens vegvesen.



Ertesprang bru, Sigdal i Buskerud. Bygget 1915, revet 1991. Hogget stein i sementmørtel. Foto: Statens vegvesen.

Byggingen

Byggingen startet med at fjellet ble rensket for stein, jord og dårlig fjell, og fjellfot for landkar ble etablert. Monteringsstillaset ble bygget, og landkarmurene ble murt. Hvelvet ble deretter murt fra kemper på begge sider og opp til krona. Steinen ble fraktet inn ved hjelp av kranbane eller wirebane. Jordfuktig sementmørtel ble stampet lagvis ned i fugene ved hjelp av pinner og spesiallagde jern, helt til sementmørtelen begynte å avgi fuktighet. Treletter i fugens underkant (mot forskalinga) holdt mørtelen på plass. Steinhvelvet var som regel tykkest ved kemper og tynnere på toppen, særlig dersom det ikke var leddet. Vanlige størrelser på fuger mellom steinen på de største bruene var 2-3 cm, og siden steinene som regel ikke var kileformet var fugestørrelsen gjerne størst i buens overkant.

Oppgaven med å overføre last fra stillaset til selve steinhvelvet ble på små konstruksjoner løst med trekiler. På mellomstore konstruksjoner ble det brukt senkebokser med sand. På de helt store konstruksjonene ble det brukt både trekiler og senkebokser med sand som var finharpet og tørket ved kunstig varme før den ble fylt i. Det ble til slutt viklet oljelerret rundt hvert arrangement for å holde fuktigheten borte. Stillaset hadde målepunkter for nivellering under arbeidets gang. Konstruksjonen krevde nøyaktig arbeide, gode materialer og forsiktighet ved påføringen av belastningen.

Etter at steinhvelvbuen var ferdig begynte arbeidet med overmurene, og disse ble på samme måte som hvelvet muret i forband. De fikk godt bearbeidet synlig overflate, mens innsiden var rått tilhugget. Innsiden av hvelvet og overmurene fikk en avretting av betong eller sementmørtel samt en avdekning som skulle hindre vanngjennomgang. Denne besto ofte av flere lag asfalt og sekkestrie. Vegbruer kunne ha et bearbeidet vegdekke som gjorde at vannet rant bort som overflatevann. Jernbanebruer og vegbruer med grusdekke hadde innvendig drenering. Jernbanespolet lå i gjennomgående ballast, det vil si at skinner/sviller lå fritt i pukk uten å være festet til brukonstruksjonen.

Det ble som regel utført setningsmålinger ved nivellement under alle kritiske faser av byggearbeidet, helt til prøvebelastningen etter at brua var ferdig. Byggearbeidene kunne være innstilt i flere måneder om vinteren, på grunn av faren for at vannet i sementmørtelen i fugene kunne fryse. Noen arbeidsoppgaver kunne utføres i oppvarmede rom om vinteren, som for eksempel innvendig oppretning og avdekning av flater.



Stokke bru, 7. mars 1900.
Foto: Norsk Vegmuseum.

3 Steinhvelv for nye århundrer

Med Åros bru i Sogndalsstrand i Rogaland har steinhvelvbruer på ny vist sin berettigelse. Området var av helt spesiell karakter, med tradisjonell bebyggelse og ei gammel steinhvelvbru like nedenfor det nye brustedet. Det var vilje til å finansiere ei bru som beriket miljøet, og ideen om steinhvelvbru skapte stor entusiasme i lokalmiljøet. Brua fikk mye oppmerksomhet da den ble åpnet høsten 1999, og mange ”brubyggere” ble inspirert. Statens vegvesen Rogaland og samarbeidspartnerne høstet mye viktig erfaring med byggingen, og mange av dette kapitlets tekniske og økonomiske betraktninger kan knyttes til prosjektet.

3.1 Konstruksjonsberegninger

Innledning

Både elastisitetsteori og plastiske metoder (eller mekanisme-metoder) har dannet basis for steinhvelvberegninger gjennom flere hundre år. I det britiske veg- og jernbanenettet finnes for eksempel flere titalls tusen steinhvelv, og der brukes plastiske metoder ved klassifisering. I Norge har det vært vanlig etter en kvalifisert vurdering å anta tre ledd og deretter regne et elastisk statisk bestemt system (se kapittel 2.2). Selve beregningsmetodikken har de siste 100 årene overalt vært nært knyttet til trykklinjeteori, uavhengig om en har regnet elastisk eller plastisk.

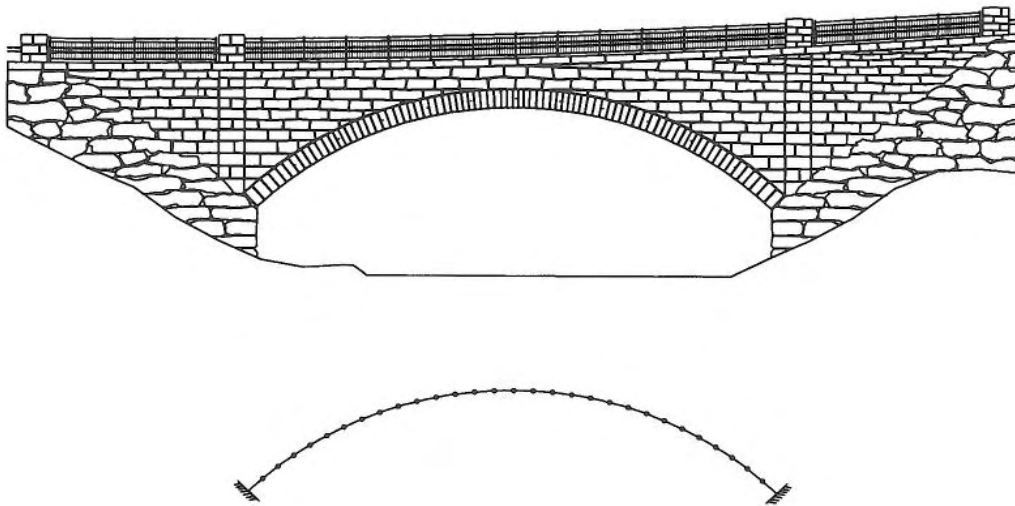
Verktøy for statiske beregninger har utviklet seg en god del siden steinhvelvbruenes storhetstid i Norge. Dataprogrammer har i mange tilfeller erstattet tabeller og omstendelig håndregning. Programmer for elastiske ramme-analyser har gjerne både interaktiv data-generering, grafiske brukergrensesnitt, automatisk generering av trafikkklaster og integrert tverrsnittskontroll. På denne måten kan enkle analyser utføres svært effektivt. Avanserte elementmetode-programmer har gjort også mer kompliserte beregninger mulig. Med ikke-lineære materialer er det for eksempel mulig å regne en del murkonstruksjoner meget nøyaktig.

I elastiske materialmodeller vil ikke tverrsnitt med strekkføyninger risse opp men få strekkspenninger. Nye steinhvelvbruer bør prosjekteres for moderat opprissing, og da er elastiske analyser som regel riktige nok. Forslag til en enkel men rimelig riktig beregningsmetode for prosjektering av nye steinhvelvbruer med hel overmur er beskrevet nedenfor. Beregningene er delt opp i *systemanalyse* og *tverrsnittsanalyse*. Systemanalysen er de statiske beregningene av det idealiserte bæresystemet for brua i lengderetningen, mens tverrsnittsanalysen er spenning/tøynings-analysen og styrke/opprissings-vurderingene av tverrsnittene.

For videre teoretisk fordypning finnes i vedlegg B ei fyldig referanseliste for relevant litteratur.

Systemanalyse

Et elastisk rammeprogram eller elementmetode-program forutsettes brukt i systemanalysen. Buen alene representerer det komplette statiske systemet (se Figur 9), og den idealiseres til et plant system av 30-40 bjelkeelementer med geometri som et vertikalt snitt i bruas senterlinje.



Figur 9. Oppriss av bru og statisk system for buen med noder angitt.

Buen kan ha ledd ved kemper og i krona, og leddene kan være midlertidige eller permanente. En løsning med ledd ved kemper i byggetilstanden (toledd-bue) som støpes igjen før åpning (innspent bue) vil som regel gi optimal utnyttelse av en jevntykk bue. I systemanalysen løses dette eventuelt med separate analyser for egenvekt og temperatur/trafikklast. Snittkrefter for de to analysene adderes da før tverrsnittsanalysen.

Buens bredde tilpasses trafikklastenes virkning på buen. Sideveis skal trafikklastene plasseres ytterst i forhold til bruas føringsbredde, og dette blir som regel eksentrisk i forhold til bruas senterlinje. For et plant system løses dette ved å neglisjere deler av buetverrsnittets bredde slik at gjenstående tverrsnitt tilsvarer den delen av buen som får sentrisk trafikklast.

Sidemurene, særlig på ei smal bru, vil forbedre lastspredningen fra konsentrerte laster ned på buen. En solid sidemur gir i tillegg øket stivhet og styrke. Dette betyr igjen reduserte nedbøyninger og øket bæreevne. Effekten er imidlertid virksom bare på kantene. Midt inne på ei bred bru vil sidemurene i liten grad belastes. Murens skjærstyrke er dessuten liten og vanskelig å tallfeste. Disse bidragene fra sidemurene er derfor neglisjert.

E-modul og temperatur-utvidelseskoeffisient for buen velges som for steinen. For en gitt bergart kan E-modulen variere i ulike retninger og på ulike steder i bruddet. I steinhvelv-beregninger er det temperaturkreftene som sterkest påvirkes av E-modulen, og den må derfor også vurderes i forhold til temperaturvariasjonens størrelse og varighet. Det har vært vanlig å regne med moderate E-moduler, i størrelsesorden 10.000–20.000 MPa, men dette må vurderes i hvert enkelt tilfelle.

Egenvekter baseres på målte eller spesifiserte egenvekter for stein og innfyllmasse. Buens egenvekt genereres for de fleste programmer automatisk når materialets egenvekt er gitt. Overmurenes, innfyllmassens og bruplates egenvekt på buen er gitt av høyden opp til kjørebanelen, og lasten gir følgende vertikalt og horisontalt trykk på buen:

$$g_{vert} = \gamma h$$

$$g_{hor} = K_0' g_{vert}$$

der

g_{vert} er det vertikale trykket et valgt sted på buen (kN/m²)

g_{hor} er det tilhørende horisontale trykket (kN/m²)

γ er innfyllmassens egenvekt (kN/m³)

h er høyden fra buens overkant opp til kjørebanelen (m)

K_0' er innfyllmassens (effektive) hviletrykkskoeffisient (-)

Overmurenes egenvekt settes lik innfyllmassens egenvekt, og høyden må måles fra buens overkant og ikke fra systemlinja. Jordtrykkskoeffisienten bestemmes på bakgrunn av innfyllmassens material. For komprimerte løsmasser ligger den gjerne i området 0,40–0,50, for magerbetong rundt 0,20. En lav verdi av jordtrykkskoeffisienten kan også være ugunstig, og $K_0'/2$ er som regel et rimelig estimat i disse tilfellene.

De jevnt fordelte trykkene gjøres om til konsentrerte nodelaster på buen, og lasten for en node i vil da bli lik trykket multiplisert med arealet av buen som naturlig knyttes til noden (halve utbredelsen av de tilknyttede elementene);

$$G_{i-vert} = g_{vert} b \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{2}$$

$$G_{i-hor} = g_{hor} b \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2}$$

der

G_{i-vert} er vertikal nodelast på node i (kN)

G_{i-hor} er horisontal nodelast på node i (kN)

b er buens bredde ved node i (m)

x_{i+1} er horisontal koordinat for den ene tilgrensende noden (m)

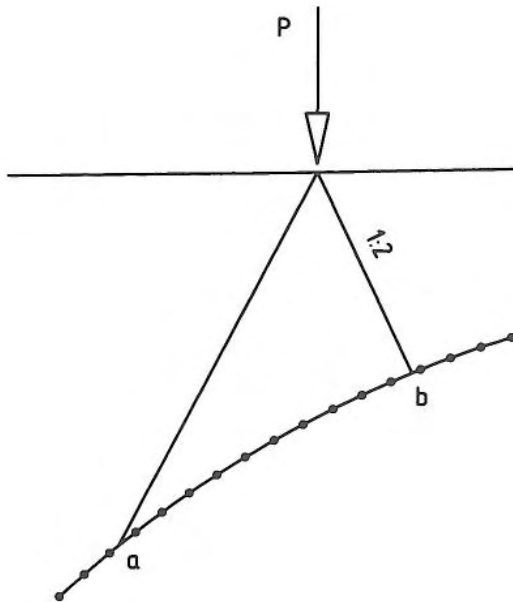
x_{i-1} er horisontal koordinat for den andre tilgrensende noden (m)

y_{i+1} er vertikal koordinat for den ene tilgrensende noden (m)

y_{i-1} er vertikal koordinat for den andre tilgrensende noden (m)

Jordtrykk (og andre trykk) som virker på buens overkant angriper buens statiske system med en eksentrisitet (vertikalt og i bruas lengderetning) i forhold til systemlinja. For tykke buetverrsnitt og korte elementlengder, og for deler av buen med stort fall, kan det være nødvendig å ta hensyn til denne eksentrisiteten. I de fleste tilfeller kan den neglisjeres.

Vertikale akseltrykk (knivlaster) på kjørebanelen fordeles nedover i innfyllmassen og ned på systemlinja med spredningsvinkel 1:2 (ca 27 grader i begge retninger, se Figur 10).



Figur 10. Vertikal konsentrert trafikklast og spredning i innfyllmassen

Lasten virker reelt med et trykk på buen som avhenger av innfyllmassens høyde, med høyest trykk nærmest kjørebanelen og lavere trykk lenger ned i innfyllmassen. Dette kan forenkles til et jevnt fordelt vertikalt og horisontalt trykk på hele den belastede delen av buen.

Trykk på buen fra laster som spres nedover i innfyllmassen og delvis faller utenfor buens utbredelse reduseres i forhold til andelen av lasten som virkelig belaster buen.

Trykket påføres systemet som nodelaster, og hver node innenfor belastet del av buen får følgende vertikale og horisontale laster:

$$P_{vert} = \frac{P}{n}$$

$$P_{hor} = \frac{y_b - y_a}{x_b - x_a} \frac{K_0' P}{n}$$

der

P_{vert} er vertikal nodelast (kN)

P_{hor} er horisontal nodelast (kN)

n er antall noder innenfor belastet del av buen (-)

y_a er vertikal koordinat for startpunkt for belastet del av buen (m)

y_b er vertikal koordinat for endepunkt for belastet del av buen (m)

x_a er horisontal koordinat for startpunkt for belastet del av buen (m)

x_b er horisontal koordinat for endepunkt for belastet del av buen (m)

De horisontale nodelastene justeres altså for å ta hensyn til jordtrykkskoeffisienten, samt at trykket virker over en gitt høyde ($y_b - y_a$) av buen i stedet for en gitt lengde ($x_b - x_a$).

Trafikklastenes ugunstigste plassering i bruas lengderetning bestemmes ved å se på momentfordeling og buens utnyttelse for dimensjonerende akseltrykk med ulike plasseringer på kjørebanelen. Akseltrykket må i disse testkjøringene kombineres med egenvekt, temperaturlaster og eventuelle andre trafikklaster.

Vertikale jevnt fordelte trafikklaster på kjørebanelen fordeles nedover i innfyllmassen og påføres buen på samme måte som vertikale akseltrykk. Jevnt fordelt trafikklaster på deler av brua kan være mest ugunstig, for eksempel bare et kort stykke over krona eller over den ene halvdel av brua (mellom krona og kemper).

Bremselaster og sidelaster angriper på samme sted som vertikale aksellaster med ugunstigste retning og fordeles horisontalt gjennom innfyllmassen med spredningsvinkel 1:2. For ei lita bru med høy overmur tas mye av bremselastera opp av grunnen utenfor brua uten at buen belastes. For ei større bru med lavere overmur kan buen få større belastning. En vurdering av om - og eventuelt hvordan - bremselaster og sidelaster skal påføres analysemodellen må gjøres i hvert enkelt tilfelle.

Jevn temperaturvariasjon bestemmes i henhold til prosjekteringsregler. Buer med overmurer og innfyllmasse får små temperaturgradienter, og denne effekten kan neglisjeres.

Lastene kombineres til slutt med lastfaktorer som for bruddgrensetilstanden. For kontroll av opprissing virker som regel egenvekt gunstig (stabiliserende), og en lav lastfaktor bør velges. For kontroll av trykkspenninger vil derimot en høy lastfaktor være ugunstig.

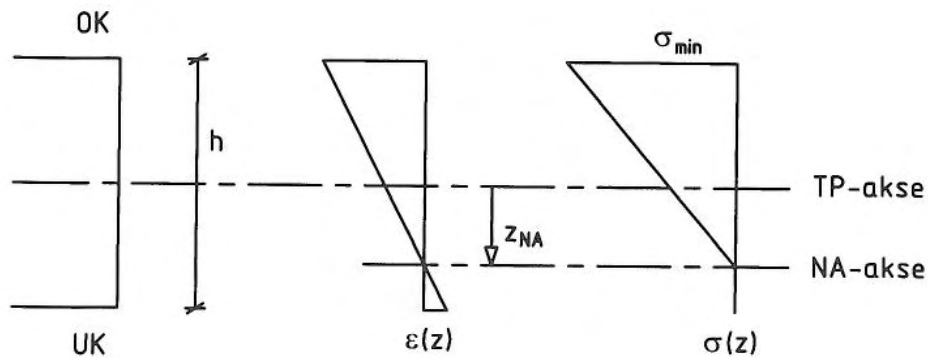
Tverrsnittsanalyse av buen

Aksialkrefter og bøyemomenter leses ut fra systemanalysen, og eksentrisiteter beregnes for alle deler av buen for alle kritiske lastkombinasjoner;

$$e = \frac{M}{N}$$

Eksentrisiteten uttrykker trykklinjas avstand fra tverrsnittets tyngdepunkt-akse. Tverrsnittet er rektangulært, og ved $|e| < h/6$ ligger trykklinja innenfor *kjernetverrsnittet* og ingen del av tverrsnittet har strekktoyninger. Med $|e|$ mellom $h/6$ og $h/2$ har tverrsnittet strekktoyninger, i virkeligheten opprissing. Murverk har ikke strekkstyrke, og $|e| = h/2$ (OK eller UK rand) blir dermed ei teoretisk grense for trykklinjas plassering.

Tverrsnittsanalysen kan forenklet forutsette et material med lineært elastisk oppførsel for trykktøyninger og null strekkstyrke (opprissing) for strekktøyninger. Dette er vist i Figur 11 nedenfor. Nøytralaksens avstand fra tyngdepunkt-aksen, z_{NA} , og største trykkspenning, σ_{min} , avledes av eksentrisiteten og er gitt i Tabell 5 nedenfor, med fortegn i henhold til Figur 11. b er buebredden som er brukt i analysen.



Figur 11. Tøyninger/spenninger for buetverrsnitt med en liten strekksone

		z_{NA}	σ_{min}
$ e < \frac{h}{6}$	Trykk over hele tverrsnittet	$-\frac{h^2}{12e}$	$\frac{N}{bh} - \left \frac{6M}{bh^2} \right $
$\frac{h}{6} < e < \frac{h}{2}$	Trykk + strekk	$e < 0$ Strekk i UK	$\frac{2N}{b(\frac{h}{2} + z_{NA})}$
		$e > 0$ Strekk i OK	$\frac{2N}{b(\frac{h}{2} - z_{NA})}$

Tabell 5. Nøytralaksens plassering og største trykkspenning

$|e| = h/6$ gir altså trykk i hele tverrsnittet, og av tabellen kan ellers beregnes at $|e| = h/4$ gir riss i kvarte tverrsnittshøyden, og $|e| = h/3$ gir riss i halve tverrsnittshøyden.

Andre beregninger

Modellen som er beskrevet (systemanalyse + tverrsnittsanalyse) tar hånd om de statiske beregningene i bruas lengderetning i driftsfase. I komplette konstruksjonsberegninger må denne analysen suppleres med blant annet kontroll av buen i byggetilstand og stabilitetskontroll av overmurene for både byggetilstand og driftsfase.

Regneeksempel

Et eksempel på den beskrevne metoden tar utgangspunkt i Åros bru i Rogaland (Figur 9).

Hvelvet er en symmetrisk 1,0 m tykk bue med teoretisk (til buens senterlinje) spennvidde 25,0 meter og pilhøyde 5,0 meter. Innfyllsmassen har høyde 6,3 meter over venstre kemper, 1,5 meter over krona og 7,2 meter over høyre kemper. Brua hadde ledd i kemper i byggefasesen.

Hvelvet har ytre bredde 7,8 meter og føringsbredde 6,8 meter, og det betyr at hvelvet stikker 0,5 meter utenfor føringsbredden. Trafikklastenes lastfelt har bredde 6,0 meter, og disse skal plasseres ytterst i føringsbredden. For å lage et plant system med sentrisk trafikklast er derfor en buebredde på $6,0 + 2 \times 0,5 = 7,0$ meter modellert.

Steinen (gabbro) har densitet 28 kN/m^3 og temperaturutvidelses-koeffisient $0,35 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Innfyllsmassen er magerbetong/sparestein med densitet 25 kN/m^3 og antatt K_0 lik 0,20. Buens E-modul er satt til 15.000 MPa . T_{0+} er 25°C og T_{0-} er -15°C .

Jevnt fordelt trafikklast med to lasttog med 9 kN/m (totalt 18 kN/m) i hele eller halve bruas lengde er modellert. Ugunstigste plassering av knivlaster er ved influensbetraktninger funnet å ligge like utenfor \wedge -punktet. To lasttog V1 plasseres hver sin vei med første knivlast ved siden av hverandre. Bremselast 500 kN angriper på samme sted som største akseltrykk. Halvparten antas å gå over buen, mens halvparten fordeles som horisontal nodelast på de fem øverste nodene av buen.

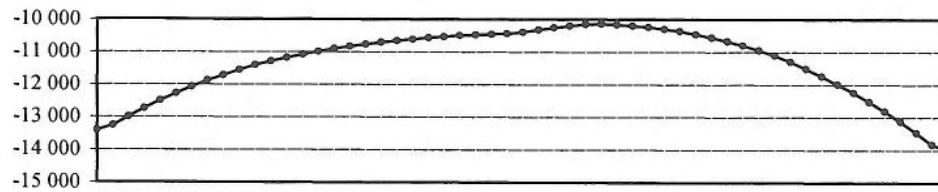
Kritisk lastkombinasjon i bruddgrensetilstanden er BRD-B med egenvekt (faktor 1,0), temperatur (faktor 0,8) og trafikklast (faktor 1,2). Resultater er vist i Figur 12. Største eksentrisitet er 242 mm, som tilsvarer $h/4,1$, eller rissdybde lik omtrent kvarte tverrsnittet.

Største trykkspenning er beregnet til $4,7 \text{ MPa}$ for BRD-A med egenvekt (faktor 1,2) og trafikklast (faktor 1,3).

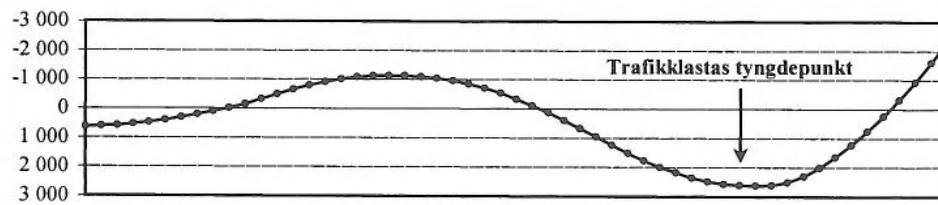
Åros Bru

BRD-B (egenvekt x 1,0, trafikklast x 1,2 og temperatur x 0,8)

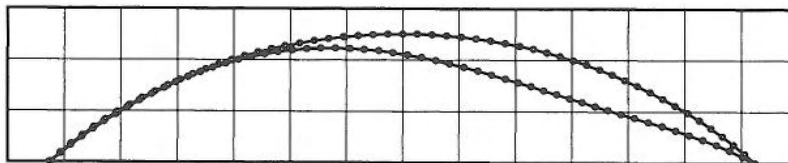
Aksialkrefter



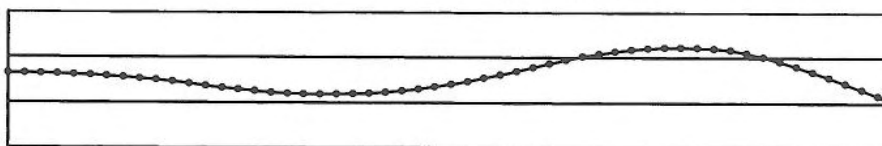
Bøyemomenter



Forskyvninger



Lengdesnitt av buen med kjernetverrsnittet og trykklinjas eksentrisitet



$$|e|_{\max} = 242 \text{ mm}$$
$$\sigma_{\min} = -4,0 \text{ MPa}$$

Figur 12. Resultater for kritisk lastkombinasjon, Åros bru

3.2 Steinproduksjon

Steinens egenskaper

Felleseuropeiske standarder etter EN 1926 brukes i dag ved kontroll av steinmaterialer. Prøvene er normerte og varierer avhengig av materialtype og lastens retning i forhold til strukturen i steinmaterialet. Siden prøvemethodikken er endret, så kan ikke verdiene fra dagens prøveresultater sammenlignes direkte med tidligere tiders resultater. I tabell 6 vises imidlertid noen typiske verdier (testet etter EN 1926) for mekaniske egenskaper for noen norske bergarter.

Steintype	Egenvekt g/cm ³	Trykkfasthet MPa	Bøyefasthet MPa	E-modul ved bøyning MPa
Gneis	2,6 - 2,7	130 - 210	8 - 28	147 000
Granitt	2,6 - 2,7	100 - 275	5 - 21	16 000 - 83 000
Gabbro	3 ,0	125 - 350	13 - 28	59 000 - 143 000
Kalkstein	2,7	75 - 180	3 - 18	153 000

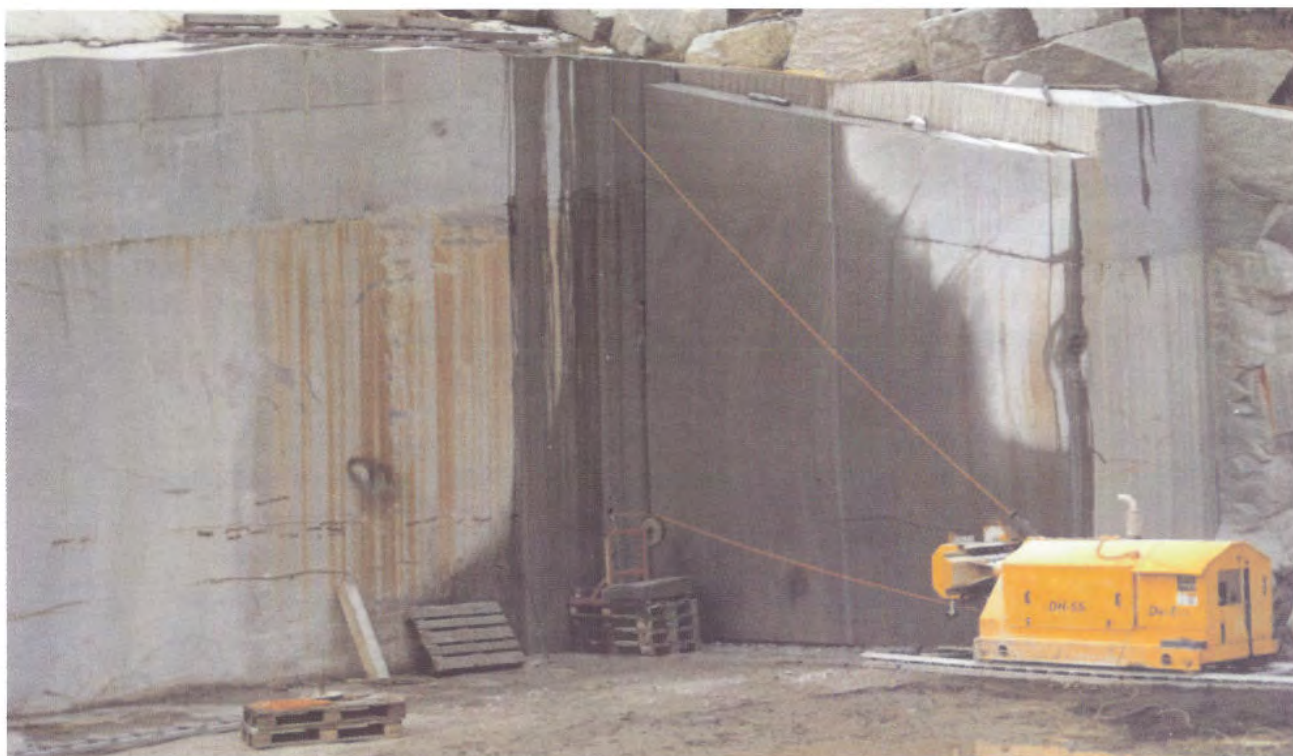
Tabell 6. Mekaniske egenskaper for noen norske bergarter. Den store variasjonen i styrke og E-modul avspeiler egenskapene i ulike retninger i forhold til bergartens oppbygging. Bøyefastheten uttrykker i praksis strekkstyrken. Der bare én verdi er angitt er bare én prøve testet.

Steinens trykkstyrke ligger gjerne langt over mørtelens. Steinens bestandighet, tilgjengelighet og muligheter for bearbeiding er som regel viktigere når egnetheten skal vurderes. Kalkstein kan for eksempel være utsatt for misfarging og forvitring, og dette påvirker både estetikk og levetid. Granitt og gabbro er eksempler på mer bestandige bergarter.

Ingen bergarter er helt isotrope, og de fleste granitter (og spesielt de finkornige) har én eller flere velutviklede kløvretninger. Disse krever mindre overflatebearbeiding og er derfor attraktive materialer for forming av elementer i ulike dimensjoner. I det følgende omtales derfor først og fremst granitt som byggemateriale i bruer.

Uttaksmetoder

Ulike materialer krever gjerne ulike uttaksmetoder. Tradisjonelle uttaksmetoder for granitt har vært basert på boring av hull og sprenging. Uttak av naturstein i brudd har imidlertid de senere år gjennomgått en rivende utvikling, og tradisjonelle metoder er delvis erstattet av *saging med diamantline*. Metoden egner seg spesielt der man har en slett brytningsfront (se vedlegg A) med kun en fri kant. Det bores et vertikalt og et horisontalt hull som møtes i bakre kant, linen tres gjennom borhullene, skjøtes til en endeløs rundslinge og tres over drivhjul på diesel- eller elektrisk drevet maskineri på skinner. Bunn og bakside løsnes til slutt ved sprengning. Selve lina består av en ca 5 mm tykk tvunnet stålkjerne med diamantperler, ca 35-40 stk pr løpemeter, tredd utenpå og vulket fast til kjernen. Lina er tvunnet for at den skal rotere under sagingen og få jevn slitasje.



Saging med diamantline. Foto: Kurt Sandman

Under sageprosessen tilføres vann i passende mengde for kjøling, smøring og bortvasking av slam. Bruk av line er en skånsom metode for steinen. Man unngår knusing og skytestikk i blokkene og line "stjeler" lite av fjellet. Forekomsten utnyttes dermed bedre.

Jet-brenning er en annen metode for å løsne blokk der en har bare én fri kant. Brenningen skjer med åpen flamme fra en blanding av diesel og luft som tilføres slissen som skal brennes ut via et spesielt brennerrør påsatt munnstykke. Metoden er meget støyende og er lite gunstig der det er boliger innenfor en radius på ca 1 km. Metoden gir dessuten stort svinn siden slissen blir 10-12 cm bred.

Oppdeling

En *storkubbe* som løsnes fra fast fjell som beskrevet over kan være på 1.000 m³ eller mer. Storkubben deles opp til håndterlige blokkstørrelser, *storblokker*, på ca 10 m³, ved *remming*. Remming innebærer at det bores hull nøyaktig innrettet og til en viss dybde av kubben, før hullene fylles med sortkrutt, tennere og fordemning og sprenges. Fra storblokk til *småblokk* og *ferdige elementer* (produkter) benyttes stort sett manuell kiling. Som bruddanviser bores 8-10 cm dype kilehull nøyaktig innrettet som en søm (*kilesøm*) over hele lengden av arbeidsstykket. *Kortkiler* (små kileformede jernstykker) og *blekker* (avrundede, halvskål-formede stålplater) settes i hullene, og man slår på kilene etter tur med slegge til blokken sprekker. *Hydrauliske kiler* ble benyttet på Åros bru, og dette var både effektivt og økonomisk.

I de senere år er det utviklet stasjonære diamantsager for saging av plater fra blokk i fabrikk. Fordeler fremfor tradisjonelle blokksager med sagblad er at det kan sages av større blokker og at det finnes avanserte styringsmuligheter for kontursaging.



*Deling av storblokk. Som av kortkiler og blekker.
Foto: Kurt Sandman*

Bearbeiding av overflater

Definisjoner på bearbeiding av overflater på naturstein er vist i tabell 7.

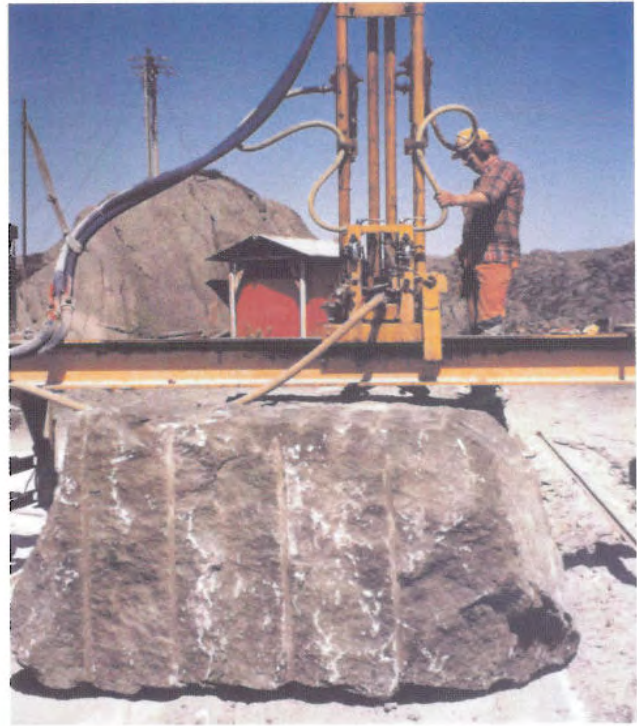
Betegnelse	Beskrivelse
Naturplan	Naturlig kløvflate
Råkilt	Ubearbeidet kløvflate med boremerker eller kilemerker
Råhugget	Råkilte emner der kilemerker og knøler er fjernet
Grovhugget	Formgivning og overflatebehandling med piggmeisel
Finhugget	Formgivning og overflatebehandling med prikk- eller riffelhammer eller maskinjevnet
Flammet	Brent (kvartholdige bergsarter)

Tabell 7. Bearbeiding av overflater på naturstein.

Der flatene ikke skal være synlige stilles naturlig nok heller ingen visuelle krav. Krav til fugebredde eller mekanisk heft til fugemasse vil avgjøre hvilken overflateruhet som kreves på ikke synlige flater. En tørrmur vil for eksempel som oftest være tilfredsstilt med råkilte flater, selv om det kan være nødvendig med råhugging for å få smale nok fuger. Det samme vil være tilfelle om en ønsker å bruke fugemasse. Synlige flater vil derimot ha rene arkitektoniske krav. I disse tilfellene kan *råhugging* eller *gradhugging* (grovhugging/finhugging) være nødvendig.



*Råkilt overflate, naturplan med merker etter utstyret som ble brukt under kløyvingen. Gjennomgående borhull tyder på dårlig utviklede kløvretninger. Fra Åros bru.
Foto: Per Eikemo/Hilmar Selseng*



*Borrigg for produksjon av hvelvblokk til Åros bru.
Foto: Per Eikemo/Hilmar Selseng*

Kantene kan *tuktes* eller *settes*, og det vil si at de jevnhugges i visflata. Bearbeiding av overflater utføres i dag gjerne med maskinell meiselhammer.

I steinhvelv med *knase fuger* (uten bruk av fugemasse) stilles krav til stein-overflatas planhet. Flatene må råhugges eller gradhugges, og slik bearbeiding er kostbar. I steinhvelv med mørtelfuger vil råkilte flater velges for å sikre god heft. Bue med fuger er derfor også en langt rimeligere og mer aktuell løsning for steinhvelvbruer.

Arbeid på brustedet

Trykkbuen alene vil gjerne kreve flere hundre tonn stein. For transportkostnadene er det gunstig at så mye bearbeiding som mulig skjer i bruddet. Det er imidlertid ikke realistisk at bruelementene kan gjøres helt ferdige i brudd, og det vil alltid være nødvendig med huggerkompetanse på brustedet for å dele blokker og bearbeide overflaten.

3.3 Utforming og byggemetoder

Materialer

Steinens egenskaper er diskutert i forrige kapittel. Hvilke bergarter som er aktuelle for ei bru er i stor grad gitt av lokale forekomster og mulighetene for utvinning og transport. Åros bru er for eksempel bygd med anortositt fra et lokalt brudd, og steinens overflater er bare i liten grad bearbeidet (råkilt).

Mørtelen må ha tilstrekkelig trykkstyrke, og C35 vil for de fleste tilfeller være tilstrekkelig. Dersom tilslaget i mørtelen er alkali-reaktivt må sementen være lav-alkalisk for å forebygge geldannelse og ekspansjon. Mørtelen må være tett, slik at fukt ikke kan transporteres til overflata og gi skjolder og fargeforandringer på steinen. For god heft til fuger anbefales slemming av steinflater med sementbasert lim eller vasking med høytrykkspyler.

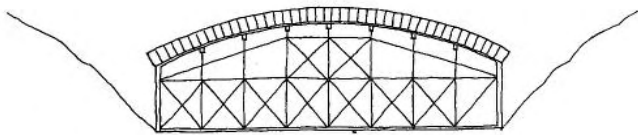
Armert betong vil som regel bli valgt på steinens bekostning for konstruksjonsdeler som krever et material med god formbarhet, som for eksempel bruplate og kantbjelker. På ei vegbru med mye saltning er disse områdene utsatt for miljøangrep og muligheter for armeringskorrosjon akkurat som betongbruer forøvrig. Vanlige forholdsregler (god drenering og riktig overdekning osv) og betong med gode bestandighetsegenskaper (SV-40) er derfor påkrevet. Jernbanebruer saltes ikke og er - i hvert fall der det ikke går offentlig veg som saltes under brua - i større grad forskånet for disse problemene.

Materialvalg og overflatebehandling for ståldetaljer som drenering, rekkverksinnføring og selve rekkverket, utføres på samme måte som for andre bruer.

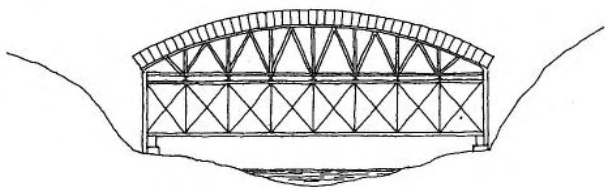
Stillas

Foruten tradisjonelle stillaser av tømmer har vi i dag tilgang til stålrørstillaser. Fordelen med disse er at de er raske å montere og kan benyttes som faste stillaser direkte fundamentert på bakken eller i kombinasjon med et frittstående system. Systemet tilpasses prefabrikerte buesystemer (buestilling) som monteres på stillaset. Et frittstående stillas kan være alt fra bjelker av stålprofiler til spesiallagede fagverk- eller platebærersystemer. Spennvidder, topografiske forhold og fundamenteringsforhold avgjør monteringsmetode og eventuelt behov for mellomstøtter. For steinhvelvbruer i flere spenn eller for store spennvidder kan en løsning være å skreddersy buefagverk i full lengde for direkte montering av bueforskaling. Montering av disse vil kreve tilgang for en stor monteringskran eller tilstrekkelig avplanert areal bak opplegget for sammenmontering av fagverkspakken og for lansering. Kostnaden for disse buefagverkene må sannsynligvis i sin helhet avskrives på prosjektet og er derfor sterkt avhengig av prisen på stålprofiler. Fordelen ligger i en alt-i-ett-løsning uten behov for stålrørstillas og buestilling og derfor kortere monterings- og demonteringstid.

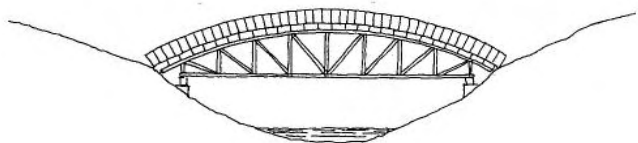
Figur 13-15 viser typiske prinsipper for stillaser.



Figur 13. Rammetårn direkte fundamentert på bakken



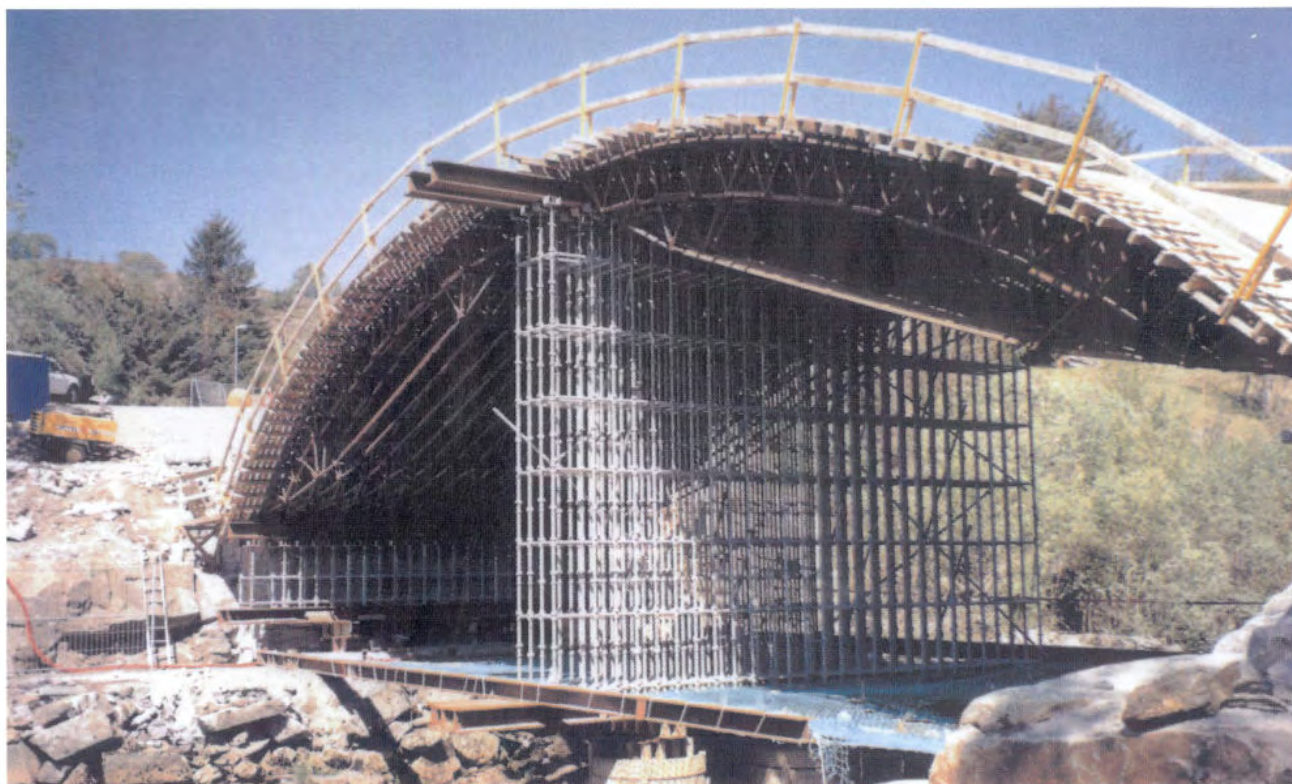
Figur 14. Frittstående fagverksbjelker med tømmerbueforskaling



Figur 15. Frittstående spesialproduserte stålfagverk.

Det er viktig at buen er stabilt opplagret i hele spennet og ikke deformeres under steinens vekt. Dersom forskalinga hviler på punktvis opplegg så kan en risikere at forskalinga mellom oppleggene bøyes ned og den mørtlede fugen over oppleggene sprekker i overkant.

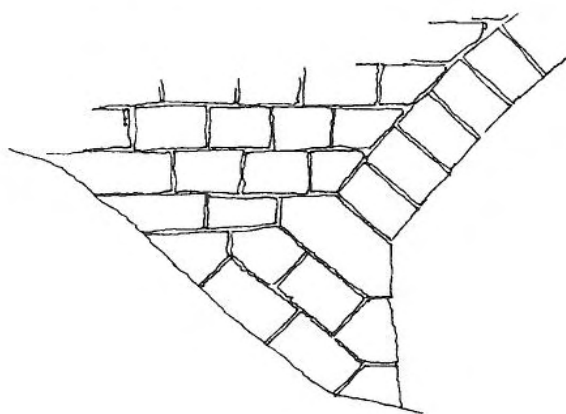
Stillaset dimensjoneres for egenvekt av hvelvet, og forskalingen senkes etter at hvelvet er oppmurt og mørtelen er tilstrekkelig herdet. 80% av karakteristisk trykkfasthet er et normalt krav. Hydrauliske jekker monteres under oppleggene for å få god kontroll over senkingen av forskalingen. Buen stemples av igjen umiddelbart etter avforskalinga (forskalinga heves opp til underkant av buen), og forskalinga bidrar dermed til at geometrien ikke endrer seg ved videre muring.



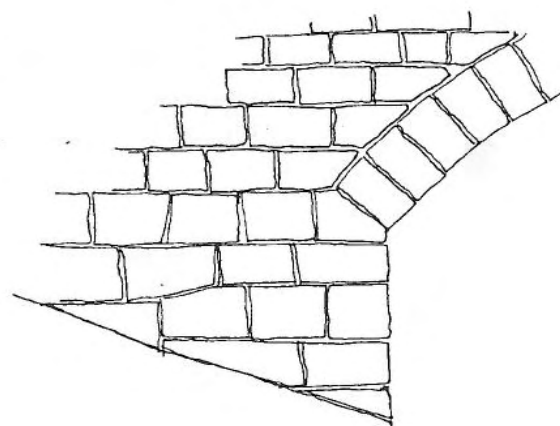
Stillas for Åros bru, Rogaland. Foto: Per Eikemo/Hilmar Selseng

Landkar/fundamentering

Steinhvelvbruer er mest økonomiske der de kan fundamenteres på fjell. Fjellet sprenges ut og hogges til for å gi høy styrke og god fortanning og avrettes med betong. Deretter mures landkarene til overkant kemper over hele brubredden før buen forskales. Landkarene kan mures normalt på buens trykklinje i kemper (Figur 16). Fugen for den ytterste steinen på den vertikale innsida utformes da horisontalt for å unngå at steinen glir eller mørtelen renner ut under muringen. Landkarene kan også mures horisontalt med siste stein ved kemper formet normalt på trykklinja (Figur 17).



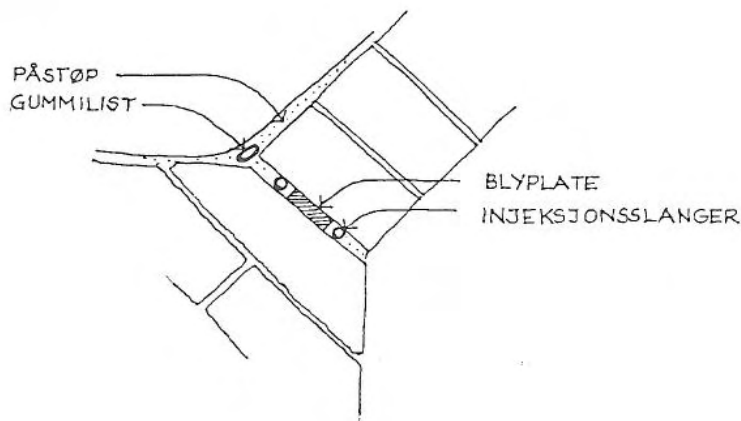
Figur 16. Landkar murt normalt på buens trykklinje.



Figur 17. Landkar murt horisontalt.

Ledd ved kemper

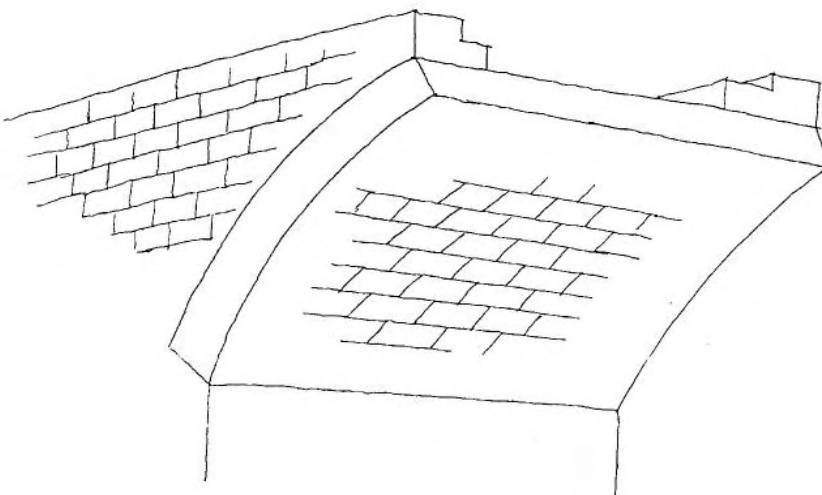
Innspenne buer vil som regel måtte være mye tykkere ved kemper enn i krona. Dersom egenvekta påføres hvelvet som en toleddsbue blir den statiske virkemåten gunstigere. Hvelvet kan bygges med mindre og konstant tykkelse. Ledd etableres derfor for å tillate rotasjoner i byggefasen. Over hele brubredden legges mellom kemper og hvelvet ei 20 mm tykk blyplate med bredde lik / av hvelvtykkelsen. Blyplata settes mot en mørtelpute i kemper før hvelvets første stein legges inntil. I fugen på både oversida og undersida av leddet plasseres injeksjonsslanger for mørtel, og fugen på undersida av leddet tettes mot hvelv og vederlag. Over fugen (mellom hvelv og kemper) tettes med gummilist før det pusses og isoleres. Etter at hvelv, overmur og innfyllmasser er ferdig oppført mørtles fugene rundt leddene. Se også Figur 18.



Figur 18. Midlertidig ledd ved kemper.

Muring av hvelvet

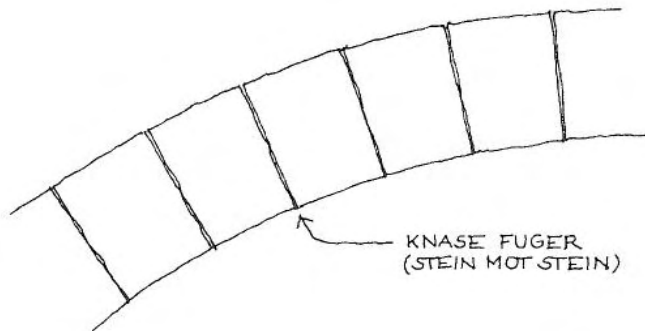
Hvelv og overmur mures i forband, hvelvet med gjennomgående fuger i bruas tverretning, overmurer med horisontale fuger (se fig. 19)



Figur 19. Hvelv og overmur i forband.

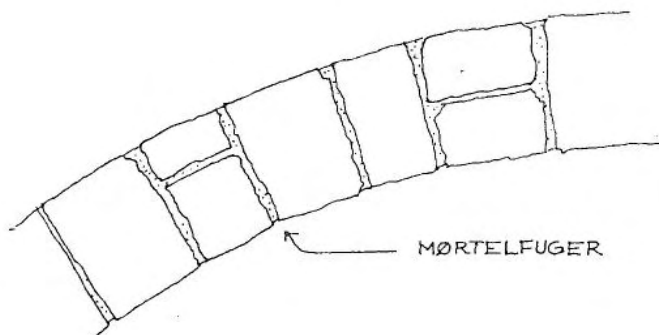
Muringen starter ved kemper/hvelvfot og utføres symmetrisk fra begge sider opp til krona. Flere typer mur er mulige.

Hvelv i tørrsteinsmur bør bare anvendes for bruer med små spennvidder. Hvelvene blir dessuten forholdsvis dyre da hver stein må tilpasses nøyaktig i kileform etter hvelvbuen, se Figur 20. Diamantsaget stein i kileform som deretter prikkhugges er et alternativ.



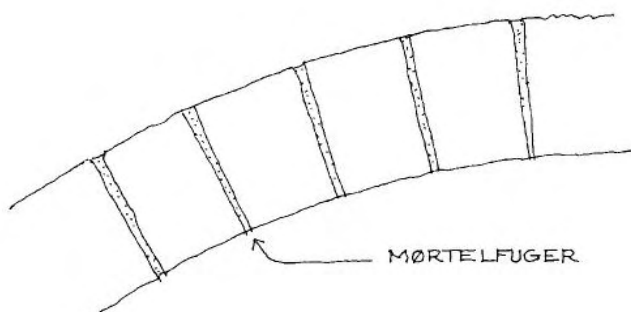
Figur 20. Hvelv i tørrsteinsmur.

Bruddsteinshvelv med mørtelfuger er en annen mulighet. Her bearbeides steinen i mindre grad, og fugene får en variert tykkelse, alt etter steinformen. Fugene skal stå mest mulig radielt.



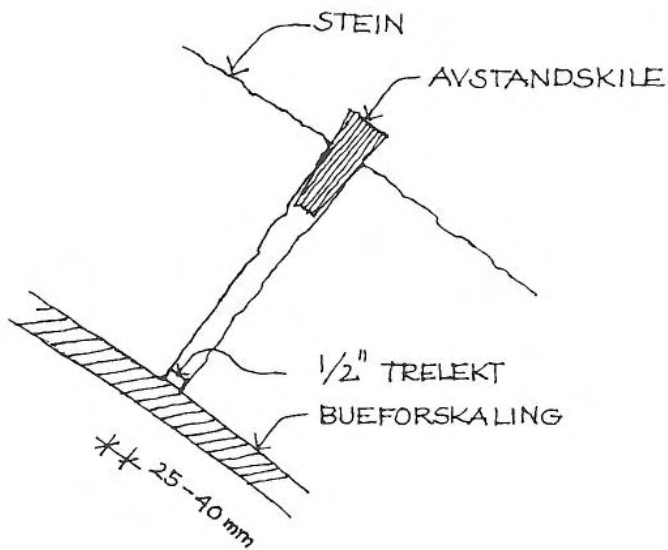
Figur 21. Bruddsteinshvelv med mørtelfuger.

Hvelv i hogget stein med mørtelfuger (Figur 22) er mest aktuelt for steinhvelvbruer i dag, og det er denne løsningen som er omtalt videre nedenfor.



Figur 22. Hvelv i hogget stein med mørtelfuger.

Steinene er som regel kilt og tilhogget. De kan utformes med diamantsaging, men da må overflatene prikkhugges for å oppnå god heft (flater med kraftoverføring) og god estetikk (synlige flater). Trykkfugene bør stå noenlunde radielt, men steinen trenger ikke ha kileform. I bunnen av hvelvet festes en tynn trelekt med høyde ca 1/2" og bredde tilsvarende fugebredden mellom steinene. Denne lekta fungerer både som avstandsholder mellom steinene og som forskaling i bunnen av fuga. Steinene løftes inn på hvelvet med hjullaster påmontert steinklype. Der avstanden er for stor benyttes mobilkran. Steinene settes løst på stillaset med små avstandskiler i topp hvelv (se Figur 23). Hver stein renses ved vasking eller høytrykksspyling før muring.



Figur 23. Plassering av stein.

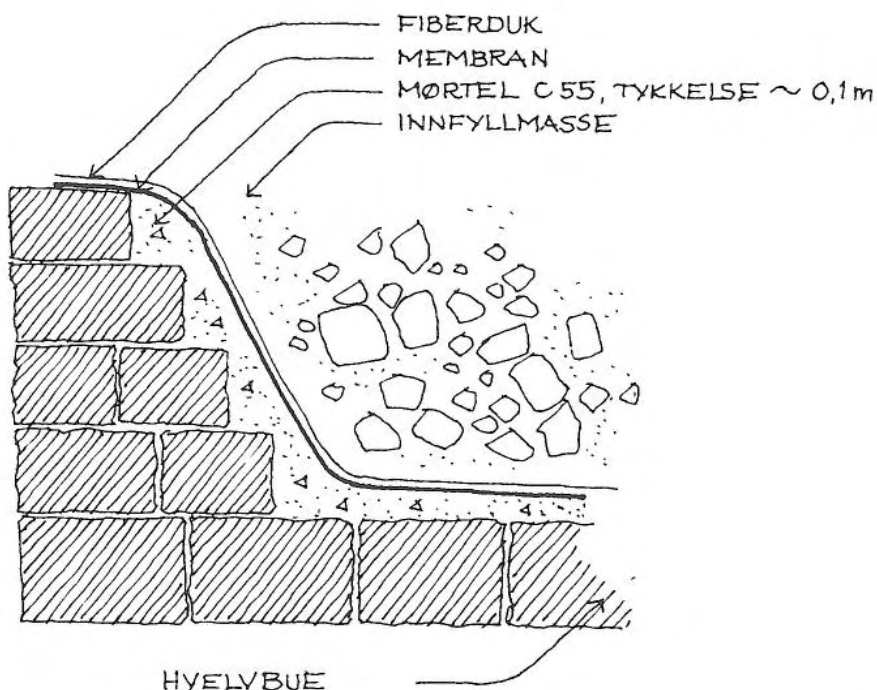


Hvelvet på Åros bru.
Foto: Per Eikemo/Hilmar Selseng

Mørtelen har tradisjonelt blitt lagt ut og stampet etter at alle steinene er lagt ut og hele hvelvet er ferdig oppmurt. I dag vil ekspanderende mørtel plassert i fugene ved hjelp av pumpe være mest aktuelt, og dette ble benyttet på Åros bru med godt resultat. Tynne stav-vibratorer brukes for å fordele og komprimere mørtelen i fugene. Det kan være fare for at fugemassen, som må være noe bløt, trenger under hvelvsteinen. Dette fører til større mørtelforbruk og mer etterarbeid etter at forskalinga er revet, og det må derfor stilles strenge krav til tetthet i forskaling. Mørtling av fugene starter fra kemper på begge sider og utføres fortløpende og symmetrisk helt til topp hvelv. Mørtling av fuger tilpasses om mulig godværsperioder med temperaturer over +5°C, og fugene må beskyttes mot nedbør i herdeperioden.

Overmur

Overmurene over hvelvbuen bygges i vertikalt forband med mørtelfuger, og mørtelen må være fast nok til at steinene kan mures på tradisjonell måte. Yttersida er vertikal og innsida skrå slik at tykkelsen avtar oppover (se Figur 24). Muren kan utformes så tykk at den motstår det horisontale trykket fra innfyllmassen med sin egen tyngde. Den kan også utformes slankere, men da må horisontalkreftene ivaretas med forankring mellom murene. Pukk/stein eller magerbetong med sparestein benyttes som innfyllmasse.



Figur 24. Snitt hvelvbue, overmur og innfyllmasse.

Overmurene kan bygges på følgende måte:

1. To skift (to høyder) med stein mures i alle fire hjørnene, på hver side av bruaksen og symmetrisk om toppen av hvelvet.
2. Hvelvets overside mellom overmurene pusses med mørtel, tykkelse ca 10 cm, med fall mot midten av hvelvet.
3. Dersom pukk/stein brukes som innfyllmasse
 - Det støpes en kile opp langs overmuren.
 - Over pusslaget/kilen legges membran som brettes ut i overmuren.
 - Over membran legges fiberduk.
4. Innfyllmasse legges ut til høyde med murt overmur. Innfyllmasse av pukk/stein komprimeres.
5. Dersom muren er for slank til beregningsmessig å motstå trykket fra innfyllmassene med sin egen vekt, legges jordarmering (geonett) med høy stivhet mellom overmurene. Dersom pukk/stein brukes som innfyllmasse må jordarmeringen forspennes.
6. Nye skift i overmur plasseres; pkt 1-5 gjentas helt til overmuren er ferdig. Muringen starter altså ved kemper og fortsetter med økende høyde innover til overmuren forbindes over krona.

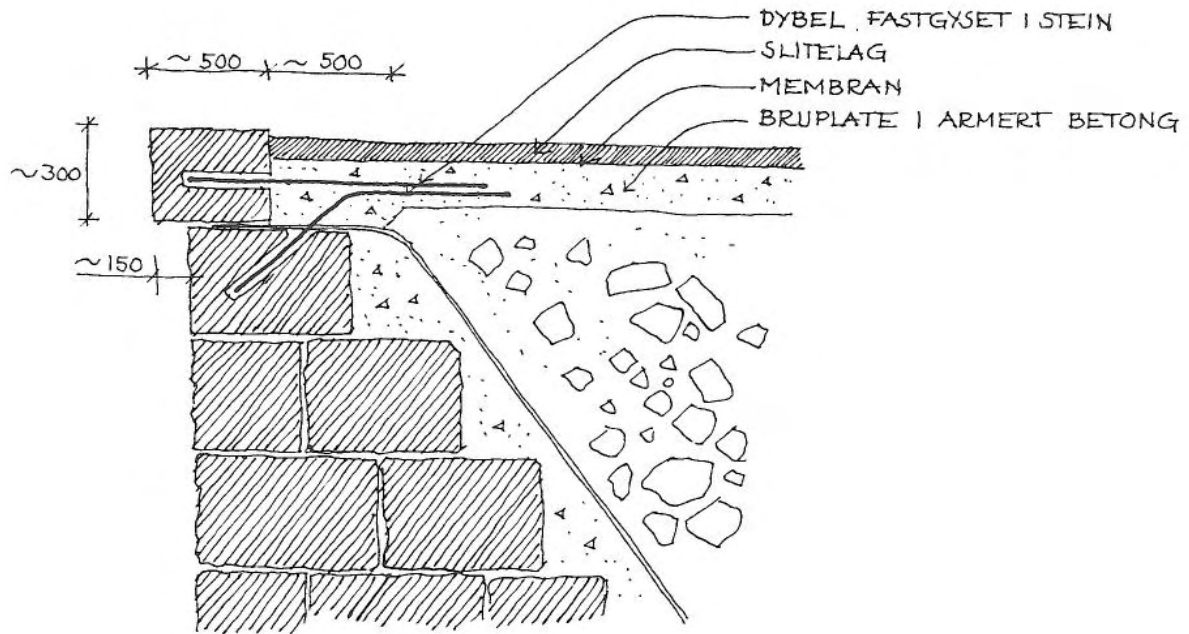
Fra kemper og utover fra buen (landkar) mures overmurer etter samme prosedyre som overmuren på hvelvet, gjerne med en pilaster på utsida av kemperfugen. Kemperfugene (se Figur 1 og ordforklaringer i vedlegg A) bør være uten mørtel men med steinen satt helt inntil hverandre. Små hvelv mures uten kemperfuge.

Bruplate

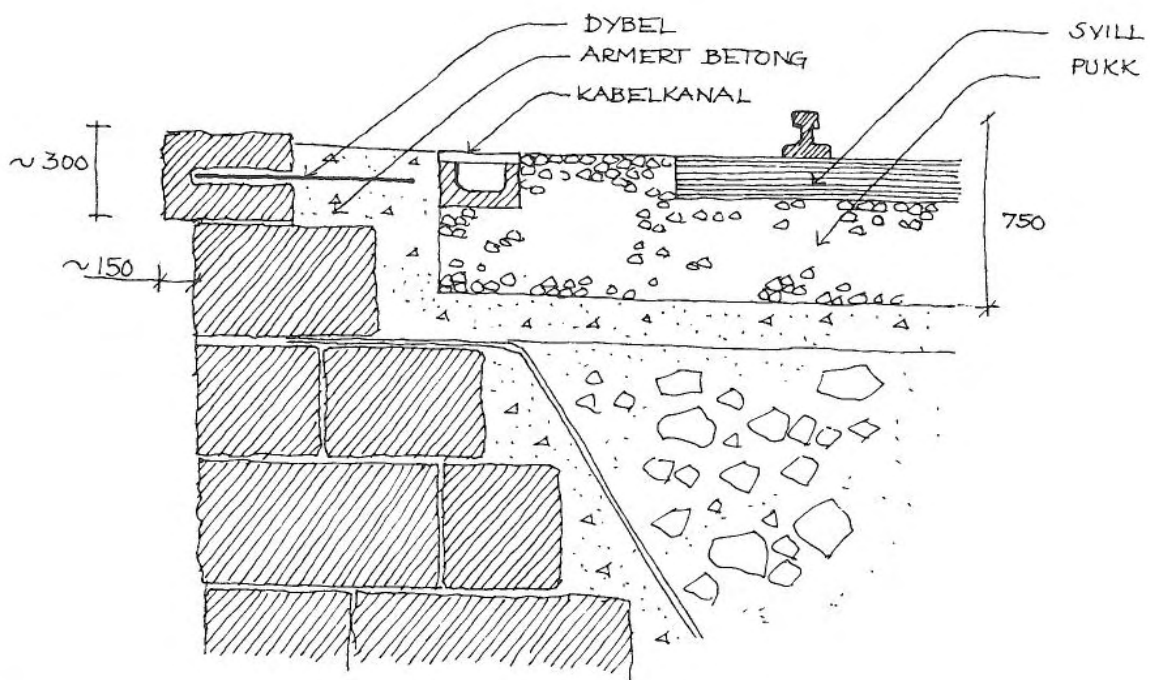
Ei 15-20 cm bruplate støpes oppå innfyllmassen. Med pukk/stein innfyllmasse må plata være dobbeltarmert (overkant + underkant), med magerbetong kan den være enkeltarmert. For jernbanebruer fylles ballastpukk til foreskrevet høyde før sporet legges. Se Figur 25 og Figur 26.

Utstyr og avsluttende arbeider

Utenfor overmur på landkar bygges *kjegler* av ordnet tørrsteinsmur. Helning 3:4 er mest brukt. *Rekkverket* gis en robust utforming og festes slik at en i størst mulig grad unngår skader på innfestingen ved vanlig trafikk. *Drenering* sikres ved at eventuelt vann i innfyllmassene ledes ut forbi kemper, under overmur på landkar og ut i tørrsteinsmur/kjegler. Drensrør med diameter 200 mm anbefales.



Figur 25. Tverrsnitt med bruplate for vegbruer.



Figur 26. Tverrsnitt med bruplate (trau) for jernbanebruer.

Gamle steinhvelvbruer utmerker seg med sin tilpasning til landskapet, først og fremst fordi stein er et materiale som “hører til” i naturen. Nye byggemetoder med mange og store anleggsmaskiner kan imidlertid føre til at sideterrenget ødelegges av terrenginngrep. Dette må følges nøye opp i byggefasen.

Problemområder

I kapittel 3.4 er noen viktige erfaringer fra vedlikeholdet av eldre steinhvelvbruer samlet, og disse problemene må tas hånd om ved utformingen av nye steinhvelvbruer. Kravene til vedlikeholdsvennlig utforming og god drenering er like viktig som for andre bruer.

Tegningsgrunnlag

I tillegg til oversiktstegning, graveplan/stikningsplan, rekkverkstegninger og eventuell terrengplan for sideterrenget, som er like for alle bruer, vil følgende arbeidstegninger som regel være nødvendig grunnlag for bygging av ei steinhvelvbru:

- Landkar: Grunnriss, plan, tverrsnitt, oppriss fra to sider og detalj ved kemper
- Bue, overmurer og bruplate: Tverrsnitt og kote/bredde-tabell
- teinhvelv: Lengdesnitt, plan og detaljer
- Bruplate: Armering og detaljer



*Kjegle og landkar på Åros bru.
Foto: Hilmar Selseng*

3.4 Drift og vedlikehold, forsterkning og ombygging

Problemområder

Gjennomtenkt og vedlikeholdsvennlig utforming er den viktigste forutsetningen for ei robust bru med lave vedlikeholdskostnader. Godt bygde steinhvelvbruer bærer alderen godt. Likevel viser tilstandskontroller at regelmessig vedlikehold er nødvendig for å unngå at skader får utvikle seg.

Dårlig drenering, først og fremst på grunn av tette avløp, fører til at vann blir stående i kassen. Overtrykket som bygges opp gjør at fuktighet trenger gjennom fugene. Kalsiumhydroksyd, Ca(OH)_2 , fra sementmørtelen blir løst opp og føres med vannet ut til overflata der det reagerer med CO_2 i lufta og danner kalsiumkarbonat, CaCO_3 . Resultatet blir skjolder og *kalkutslag* (hvite felter) på utsida.

Vegetasjon vil med årene kunne gro fram av fuger, sprekker, vannavløp og fyllmasse. Denne vegetasjonen vil over tid kunne sprengte i stykker konstruksjonsdelen.

Dårlig drenering og vegetasjon forsterker *frost- og forvittringsmekanismene* for fugemørtelen. Begroing, mose og ansamlinger av sand og støv holder godt på fuktighet og øker påkjenningene ved frost/ting.

Forvitring av utvendige fuger er et problem på eldre bruer. *Oppsprekking og avskallinger* av selve steinen ser en gjerne på mindre og eldre bruer med tørrmurte hvelv og murer.

Rekkverk uten god nok overflatebehandling vil for alle bruer kunne *korrodere*, og de kan få *mekaniske skader* for eksempel på grunn av påkjørsel.

Vedlikehold

Steinen er i seg selv vedlikeholdsfri, i hvert fall der det er brukt stein av god kvalitet. Steinhvelvbruene (med alt utstyr) har også vært betraktet som vedlikeholdsfrie. Erfaring viser imidlertid at rutinemessig vedlikehold må gjennomføres. Vegetasjon fjernes med mekanisk redskap eller trykkspyling med moderat trykk, kalkutslag fjernes ved syrevask og sprekker injiseres. Trykkspyling av steinmurenes ytre overflater gjør dem lysere og ofte mer synlig i omgivelsene. Overflatebehandling av rekkverk må fornyes med jevne mellomrom, og elementer eller hele rekkverket må vurderes skiftet ut ved alvorlige korrosjonsskader.

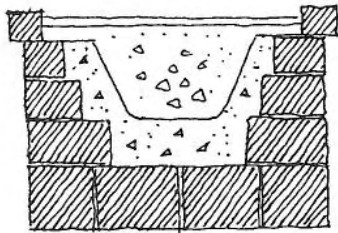
Rehabilitering

Forsømt vedlikehold og større skader vil kunne kreve mer omfattende rehabilitering. Statens vegvesen har blant annet rustet opp tørrsteinsmurte hvelv ved å injisere mørtel i fugene mellom steinene.

Forsterkning og ombygging

Med en rivende utvikling på vogntogområdet stilte etterkrigstida stadig større krav til fremkommelighet, og mange bruer måtte forsterkes, ombygges og breddeutvides. For steinhvelvbruene førte dette til en rekke - estetisk sett mer eller mindre vellykkete - tiltak for å møte de nye kravene.

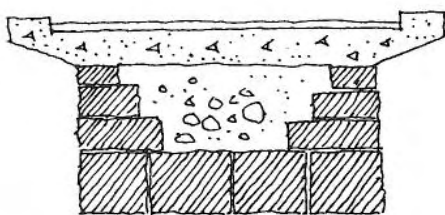
Den enkleste utbedringen består i å forsterke selve buen og sidemurene. Dette er gjort på en del gamle og spesielt bevaringsverdige tørrmurte hvelv. En påstøp av armert betong legges da oppå buen og opp langs sidemurene, inne i kassen, se Figur 27. Påstøpen kan utføres slik at den ikke er synlig, og brua bevarer sitt opprinnelige visuelle uttrykk. Membran må vurderes i forhold til bruken.



Figur 27. Forsterkning av tørrmurt hvelv.

I noen tilfeller har en forsterket gamle bruer ved å bore hull fra toppen av sidemurene og helt ned i hvelvet og gyse fast kamstål i hullene. Hullene bores da slik at de ikke kommer for nær sidemurenes vertikale fuger. Normal senteravstand er mellom 0,5 og 1,0 meter, avhengig av steinens størrelse. Tørrmurte sidemurer er ikke egnet for denne metoden, og den økede kapasiteten er vanskelig å dokumentere.

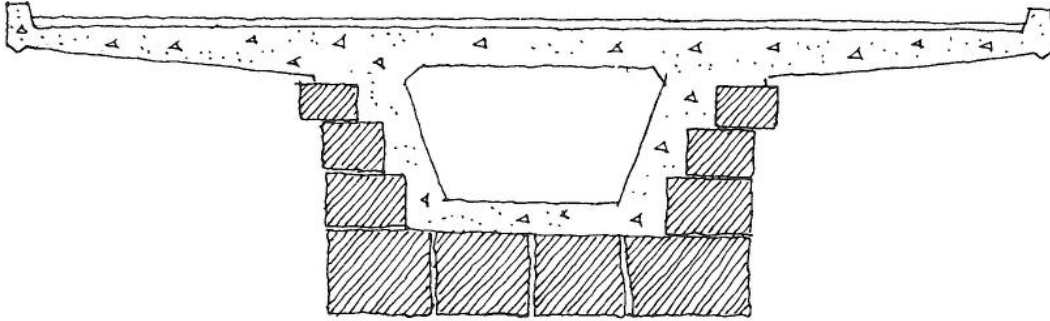
For ytterligere å oppgradere bæreevnen har den vanligste løsningen vært å støpe ei plate på toppen av det gamle steinhvelvet. Betongkonstruksjonen kan da hvile direkte på hvelvet og med øket overmurshøyde bidra til økt lastkapasitet (Figur 28). For at stein og betong skal kunne virke sammen (samvirkekonstruksjon) må betongkonstruksjonen som regel fordybles til hvelvets overmur.



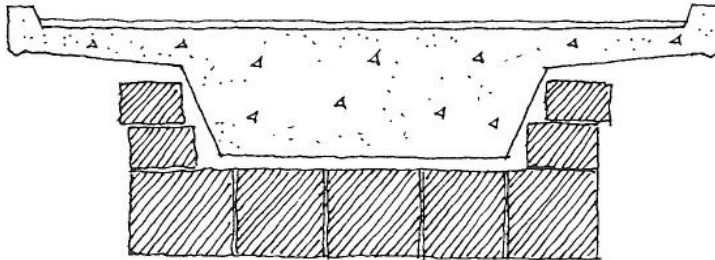
Figur 28. Hvelv med overliggende betongplate som hviler på hvelvet.

Den nye betongplata kan også gjøres selvbærende for eksempel mellom pilastre ved hvelvets kempere. Plata støpes da med en åpning på 50-100 mm mellom toppen av sidemuren og underkant betongplate. Hvelvet er dermed ikke påkjent av trafikklast.

For større bruer får plata gjerne en integrert bjelke eller kasse. Også disse konstruksjonene kan virke sammen med steinhvelvet for eksempel som i Figur 29 eller være selvbærende som i Figur 30.



Figur 29. Betydelig breddeutvidelse. Betongkasse i samvirke med steinhvelv.



Figur 30. Hvelv med selvbærende bjelkeplate.

Der bruplata i en samvirke-konstruksjon er mye bredere enn steinhvelvet vil ofte kassen være torsjonsstivt opplagt ved landkar for å avlaste buen for eksentriske laster. Utkragede bruplater gir for øvrig brua god beskyttelse for vær og vind og eliminerer eventuelle problemer med sviktende drenering.

3.5 Betong-steinhvelv

Det ble på 1920- og 1930-tallet, da betong var i ferd med å overta for stein som byggemateriale, bygget buebruer i betong forblendet med stein på buens sidekanter. Overmurene var gjerne murt på tradisjonell måte. Disse bruene framstår fra sida som "ekte" steinhvelvbruer, selv om steinen primært var et estetisk tiltak.

Også nye betong buebruer kan tenkes bygget på tilsvarende måte, med steinsatt overdekning på synlige flater. Noen vil mene at dette er "juks", andre vil peke på de mulighetene som oppstår ved lavere byggekostnader.

I tillegg til å være et rimelig estetisk tiltak så vil overflater med stein og stor overdekning til armering sikre god beskyttelse for armeringen og dermed god bestandighet.

3.6 Økonomi

Åros bru i Sokndal i Rogaland ble åpnet høsten 1999 og var den første steinhvelvbrua som er bygget i Norge siden 2. verdenskrig. Det er primært økonomiske grunner til at stål, betong og til dels tre utkonkurrerte steinhvelvene i mellomkrigstida. De siste 10-15 årene har fokus i større grad enn før vært rettet mot bestandighet og estetikk, områder der steinhvelvbruene peker seg fordelaktig ut, men likevel har terskelen for å ta opp igjen tradisjonen vært høy.

Kostnadene for Åros bru er oppsummert i Tabell 8 nedenfor. Mva er inkludert, sprengning, diverse utstyr og byggherre-kostnader er ikke inkludert.

Hovedpost	Mengde	Enhet	Kostnad 1000 kr
Rigg/drift		RS	320
Stillas og forskaling for hvelvbuen		RS	790
Stein			
Hvelvbue	627	tonn	1 110
Overmur	700	tonn	
Kantdrager	36	tonn	40
Landkar og pilaster	480	tonn	530
Kjegler og ordnet steinfylling	1 650	tonn	140
Innfyllmasse av magerbetong og sparestein			480
Armert betong bruplate		RS	
Rekkverk		RS	254
Sum			4 274

Tabell 8. Kostnader for Åros bru (1999).

Ei platebru i armert betong med samme spennvidde som steinhvelvet er kostnadsberegnet som sammenligningsgrunnlag, og byggekostnaden for denne ligger omkring 3,0 millioner kroner. Steinhvelv-alternativet ligger altså ca 60% eller 1,8 millioner kroner over billigste løsning.

Men disse tallene forteller ikke hele historien.

Viktige erfaringer ble gjort i forbindelse med Åros bru. Det var første gangen arbeidslaget bygde steinhvelv og mange løsninger og metoder måtte prøves ut underveis. Mye av dette vil komme til nytte neste gang steinhvelv står på programmet, og kostnadene må derfor også forventes redusert.

Dårlig utviklede kløvretninger for steinen gjorde det nødvendig med lange borhull (nesten gjennomgående) med korte mellomrom da blokker skulle deles. Bergarten anortositt ble valgt fordi det var ønskelig med stedegen stein (fra distriktet) i brua, men mye ville være spart dersom mer egnet stein hadde vært brukt.

Vedlikeholdskostnader over levetida inngår ikke i kostnadsberegningene. Som det gikk fram i forrige kapittel, så er heller ikke steinhvelvbruer vedlikeholdsfrie. Rekkverk og slitelag er ikke mer bestandig på ei steinhvelvbru enn andre steder. Mye av brua for øvrig antas imidlertid å være nærmest vedlikeholdsfri. Tekniske løsninger er utformet med bestandighet som viktigste hensyn, og erfaringene fra Statens vegvesen og Jernbaneverket peker da entydig på at steinhvelvbruene kommer svært gunstig ut i et lengre perspektiv.

Estetikk og gode følelser inngår heller ikke i kostnadsberegningene. Merverdien i ei vakker bru, både for byggherre, trafikanter og lokalbefolkning som skal leve med brua i mange år, kan vanskelig omsettes i tall.



Åros bru. Foto: Hilmar Selseng

4 Renaissance

Arbeidet med dette heftet og erfaringene fra byggingen av Åros bru har vist at prosjektering og bygging av steinhvelvbruer kan gjennomføres rimelig og effektivt og at ei vakker bru kan være resultatet. Kunsten å bygge steinhvelv har gjenoppstått.

Fundamentering direkte på fjell og tilgang på egnet stein i rimelig nærhet er de viktigste økonomiske forutsetningene for at steinhvelv kan være et konkurransedyktig alternativ for moderate spennvidder. En må videre se på stedets egenart, om ei steinhvelvbru passer inn og hvilke løsninger og metoder som skal velges. Steinhvelv kan være et naturlig valg på steder med preg av historiske bygningsmiljøer hvor brua er del av en helhet eller i spesielle naturlandskap som inviterer til et høyt ambisjonsnivå.

Ren nostalgi må ikke bli en mote, slik at man kopierer gamle byggeskikker uten tro på det vi i dag kan frembringe av ny ingeniørkunst og moderne byggemetoder. Eldre norsk byggeskikk står i vår bevissthet som et kvalitetsbegrep. Vi fascineres for eksempel av tømmerhusets selvfølgelige tilhørighet til landskapet. Ei steinhvelvbru er preget av den samme konstruktive klarhet og logikk, basert på generasjoners erfaringer. Det er denne arven som stadig vil appellere til oss og fortsatt gjøre steinhvelvbruer aktuelle.

Vedlegg A: Ordforklaringer

Avdekning

Mørtel-avretting av steinmurene og alle skarpe kanter inne i kassen. Se side 46.

Bakmur

Tversgående mur inne i kassen over kemper, i tilknytning til ledd.
Framheves gjerne utenpå kassen som en *pilaster*

Ballastpukk (jernbanebruer)

Pukken som svillene legges ned i, lagtykkelse 50-60 cm

Brytningsfront

Fjellets synlige vertikale overflate der steinen skal utvinnes. Kalles også *stuff*. Se side 35.

Cyklopemur

Mur av store ubearbeidede steiner av uregelmessig form med mindre steiner i mellomrommene. Se side 22.

Drenering

System for å lede vann fra kassen/trauet og ned i grunnen. På steinhvelvbruer løses dette gjerne ved at kassen er helt tett og med avløpsrør i bunnen i hver ende, ved *kemper*, som løper ut på nedsiden og innsiden av hvelvet. Se side 46.

Forband

Måte å mure på, der stein lagvis forskyves sideveis for å unngå gjennomgående fuger. Steinen mures som regel i forband vertikalt (eller langs buen) og med gjennomgående fuger horisontalt (eller på tvers av buen), men det er også mulig å mure i forband i begge retninger. Se side 42

Formasjonsplan

Uttrykk som blant annet beskriver overgangen mellom brukonstruksjon (underbygning) og *ballastpukk* (overbygning) for ei jernbanebru

Gesims

Horisontal utkrager på siden av brua; bruplata utvides ut forbi sidemuren

Hovedhvelv

Steinhvelvet i hovedspennet. Dersom ei bru har sidespenn, kalles gjerne disse buene *sidehvelv*.

Ikke lagdelte bergarter

Bergarter uten framtrødende *spaltingsplan*, for eksempel eruptive bergarter (blant annet granitt)

Ingeniørkunst

- (1) Begrep som brukes om byggekunst med utgangspunkt i konstruksjonsteknikk
- (2) I dagligtale: Når ingeniørene får æren for vakre byggverk

Innfyll

Masser av stein, grus eller magerbetong som kassen (over buen, mellom sidemurene) fylles med

Kasse

Hvelvet, sideveggene (overmuren) og bruplata danner en kasse som gjerne kalles *brukassen*. Bruer med kassetverrsnitt vil prinsipielt bære som et lukket tverrsnitt. For steinhvelv-bruer skjer bæringen i lengderetningen hovedsaklig i buen i bunnen, og de er derfor ikke kassebruer i tradisjonell forstand.

Kemper

Endene av buen, de teoretiske oppleggspunktene for buen

Kemperfuge

Vertikal fuge mellom overmuren over hvelvet og overmuren over landkaret. Se figur 1.

Kempervinkel

Vinkelen mellom buens ytterste stein og horisontalplanet. Se figur 1.

Kiling

Oppdeling av *ikke lagdelte bergarter* ved hjelp av hullboring og nedbanking av blekker og kiler, se side 37

Kjegle

Pent ordnet steinfylling, steinsetting i fyllinga inn mot landkar for å oppnå brattere skråning. Se side 46 og 48.

Kjernetverrsnitt

Angivelse av den del av buetverrsnittet som *trykklinjen* må ligge innenfor dersom kravet om trykk over hele snittet skal være oppfylt. For et rektangulært tverrsnitt er kjernetverrsnittet den midterste tredjedelen. Se kap. 2.2 og 3.1.

Kløving

Oppdeling av *ikke lagdelte bergarter*

Kløvplan

Brukes om ikke lagdelte bergarter som for eksempel granitt. Mineralorientering i fjellet som danner naturlige *kløvretninger*.

Kløvretning

Naturlige retninger for oppdeling. Brukes ved ikke lagdelte bergarter.

Knas (fuge)

Fuger uten fugemasse, der steinene ligger inntil hverandre. Se side 43.

Knøl

Naturlig kul i overflata på en stein

Kronestein

Steinen i krona, i toppen av buen. Legges inn som den siste steinen i hvelvet og framheves gjerne.

Kvadermur

Mur av stein med regulær firkantet form, hugget etter sjablon. Se side 22.

Lagdelte bergarter

Bergarter med framtrede *spaltingsplan*, for eksempel sedimentære og metamorfe bergarter (blant annet skifer)

Levetidskostnad

De totale kostnadene, inkludert drift og vedlikehold, gjennom hele levetida for en konstruksjon

Lysåpning

Den fysiske åpningen under bruspenet langs bruas senterlinje

Naturplan

Overflata som framtrer når en spalter/kløyver en naturstein, overflate som ikke er bearbeidet

Overmur

Prinsipielt det samme som *sidemur*, men begrepet brukes gjerne i konstruksjonsberegningene

Pilaster

Framheving av innvendig *bakmur* på utsida av sidemuren. Se figur 1.

Pilhøyde

Buens høyde, vertikal avstand mellom den linje som forbinder buens to kempermidtpunkter og buens (systemlinjas) midtpunkt ved krona

Prøving og feiling

Velkjent metodikk blant annet i utviklingen av nye brutyper og lengre spenn, etterhvert avløst av mer vitenskaplige tekniske beregninger. En del tidlige steinhvelv falt ned, men viktige erfaringer ble høstet. Mange imponerende steinhvelv fra epoker før mekanikkens lover var kjent står forøvrig fortsatt like fint.

Radielle skift

Stein mures utover i et radielt mønster for å fordele kreftene over et større areal. Spesielt relevant for å skape *vederlag*, ved overgangen mellom bue og fjell.

Remming

Det bores hull nøyaktig innrettet og til en viss dybde av kubben (se *storkubbe*), og hullene sprenges. Se side 36.

Ringer

Hvelv med for eksempel tre steiner over tykkelsen omtales som hvelv med tre ringer.

Sekundærbuer

Hel *sidemur* og *innfyll* over *hovedhvelvet* er erstattet av søyler av stein med buer på toppen. Kalles også *sekundærhvelv*, *småhvelv* eller *sparehvelv*. Se for eksempel Figur 8 og bilder side 12 og 14.

Sette (kanter)

Annet ord for *tukte*

Sidehvelv

Buene i sidespenn

Sidemur

Murene på sidene av kassen fra hvelvbuen opp til *gesims*, overkant kjørebane eller sville.

Kalles også *overmur*.

Skift

Lag med én steins tykkelse i steinhvelv. Et større steinhvelv kan være bygget opp av flere skift, altså flere steiner i tykkelsen.

Skorer

Kilestein i en mur, for å støtte en større stein

Spalting

Oppdeling av *lagdelte bergarter* ved hjelp av kiler eller vantrykk

Spaltingsplan

Brukes om lagdelte bergarter som for eksempel skifer. Mineralorientering i fjellet, lag anrikt av sjiktmineraler som for eksempel glimmer, som danner naturlige spalteretninger.

Spalteretning

Naturlige retninger for oppdeling. Brukes ved lagdelte bergarter

Spennvidde

Avstand mellom hvelvbuens teoretiske opplagringspunkter

Stabbesteiner

Steiner brukt som rekkverk. Kan også være feste for mer bearbeidet rekkverk i for eksempel stål.

Stillas

Konstruksjon i tre eller stål som bygges opp som understøttelse for steinene ved utlegging av hvelvet. Se side 39-40

Storkubbe

Stort stykke fjell (typisk 1.000 m³) som er løsnet fra fast fjell i et steinbrudd. Se side 36.

Storblokk

Mindre stykke fjell (typisk 10 m³) etter deling av *storkubbe*. Se side 36.

Stuff

Annet ord for *brytningsfront*

Støttelinje

Annet ord for *trykklinje*

Søm (kilesøm)

Plassering av kileretningen etter planlagte mål. 8-10 cm dype borhull angir sømmens retning og virker som bruddanviser. For bergarter uten naturlige spaltingsretninger må gjerne hullene bores nesten gjennom hele steinblokka som skal deles. Se side 37.

Trau

“Kasse uten tak”. I steinhvelvbruer vil hvelvet og sidemurene danne et trau.

Traubruer

Bruer som har bunnplate som bærer (ved bøyning og skjær) på tvers og vanger som bærer (ved bøyning og skjær) på langs, og som er åpne i toppen. Vanlig brutype for jernbane. Må ikke forveksles med ei steinhvelvbru som, uavhengig om den har bruplate i toppen eller ikke, først og fremst bærer ved aksialkrefter (og bøyning) i selve buen.

Trykklinje

Beskriver hvordan kreftene fordeler seg gjennom steinhvelvet. Trykklinjen følger buen med en avstand fra tverrsnittets senterlinje lik snittkreftenes eksentrisitet, som er lik bøyemoment dividert på normalkraft. Kalles også *trykkresultant* eller *støttelinje*.

Trykklinjemetode

Metode for konstruksjonsberegninger for steinhvelv basert på trykklinjeteori, der det viktigste dimensjoneringskriteriet er at *trykklinjen* ligger innenfor *kjernetverrsnittet*.

Trykkresultant

Resultanten av bøyemoment (M) og normalkraft (N), et annet ord for *trykklinje*

Tukte

Jevnhugge kantene i *visflate*. Kalles også å *sette*.

Vederlag

Overgangen mellom bue og fundament ved kemper. Se Figur 1.

Visflate

Synlig flate for en stein

Vedlegg B: Litteraturliste

Relevante lærebøker for en grundig innføring i tradisjonelle beregninger og byggemåter:

Benvenuto E: *An Introduction to the History of Structural Mechanics. Part II: Vaulted Structures and Elastic systems*. Springer-Verlag. Denne læreboka tar utgangspunkt i Leonardo og trekker trådene fra renessansen fram mot nyere tid uten å bli særlig nyttig for praktisk bruk.

Engelund A: *Brobygning i jernbeton, sten og tre. II. Afsnit, Hvælvede Broer af Sten og uarmeret Beton*. Forelesninger ved Danmarks Tekniske Højskole, 1934. 2. Utgave 1945 og 3. Utgave 1953. Danmarks Tekniske Højskole / Jul. Gjellerups forlag. Inneholder mye interessant stoff om byggemetoder og tekniske løsninger, en klassiker i norsk steinhvelvtradisjon.

Heyman J: *The masonry arch*. Ellis Horwood, Chichester, 1982. Svært grundig og lettlest gjennomgang av teori for steinhvelvbruer.

Strassner A: *Neuere Methoden zur Statik der Rahmen-Tragwerke und der elastischen Bogenträger; Zweiter Band; Der Bogen und das Brücken-Gewölbe*. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1938. Mye brukt i beregninger (etterregning) av norske steinhvelvbruer. Inneholder blant annet eksplisitt formelverk for bestemmelse av optimal buegeometri og influenslinjer (influenstabeller) for viktige lasttilfeller, samt beregningseksempler. Aller mest for de som gjorde tyskleksa på skolen.

Et utvalg av internasjonal (primært britisk) vitenskaplig litteratur på steinhvelv er listet nedenfor, forsøksvis systematisert etter hovedtema for de enkelte artiklene. Selv om lista er omfattende nok, så er dette bare et utvalg av den store mengden litteratur som finnes på området. Referanselistene i de nevnte artiklene skulle gjøre det mulig å nøste videre til ytterligere fordypning.

Generelt om analyse av steinhvelv

Boothby T (2001): *Load Rating of Masonry Arch Bridges*. Journal of Bridge Engineering, March/April 2001.

Bridle R G, Hughes T G (1990): *An energy method for arch bridge analysis*. Proc. Instn Civ. Engrs, Part 2, Sept 1990, 375 – 385. "Cardiff-metoden" for klassifisering av steinhvelv, sammenlignet med prøvebelastninger og FEM-beregninger.

Clemente P, Occhiuzzi A, Raithel A (1995): *Limit Behavior of Stone Arch Bridges*. Journal of Structural Engineering, juli 1995.

Cruyssen D, Beeby A (2000): *Lateral loading on masonry arch bridges*. The Structural Engineer, Vol 78, No 12, June 2000. Diskuterer innfyllmassens avstivende effekt, som hevdes ikke alltid å virke gunstig.

Gilbert M, Melbourne C (1994): *Rigid-block analysis of masonry structures*. The Structural Engineer, Vol 72, No 21, 1994.

Harvey W J (1988): *Application of the mechanism analysis to masonry arches*. The Structural Engineer, Vol 66, No 5, 1988. Diskuterer svakheter ved metodene utviklet av Heyman og foreslår modifiserte modeller.

Harvey W J (1991): *Stability, strength, elasticity and thrustlines in masonry structures*. The Structural Engineer, Vol 69, No 9, 1991. Artikkelen sikter mot å forene stabilitets-egenskaper og styrke-egenskaper i trykklinje-modellen.

Harvey W J (1995): *The origin and treatment of longitudinal cracks in masonry arches*. The Structural Engineer, Vol 73, No 23/24, 1995.

Harvey W J, Smith F W (1991): *The behaviour and assessment of multispan arches*. The Structural Engineer, Vol 69, No 24, 1991.

Heyman J (1968): *The Safety of Masonry Arches*. Int. J mech. Sci. Pergamon Press. 1969. Vol 11, pp 363-385. Dette er en forløper til forfatterens mer omfattende lærebok fra 1982 (se over). Plastiske metoder anvendes på samme måte som for eksempel i tradisjonelle beregninger stålkonstruksjoner eller betongplater. Steinhvelvenes styrke hevdes som regel å avhenge av buens geometri mer enn materialets styrke, og begrepet "geometrisk sikkerhetsfaktor" introduseres.

Mc Neely D K, Archer G C, Smith K N (1989): *Structural analysis of old stone arch bridges*. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol 16, 1989, 789-797. Heyman's metoder modifiseres for å ta hensyn til tykkere fuger med svakere mørtel.

Menditto G, Capozucca R, Traversari M (1993): *Analysis of a masonry bridge affected by cracking*. Bridge management 2. Thomas Telford, London, 1993. Tar for seg blant annet effekter av setninger.

Sinopoli A, Corradi M (1999): *A Modern Evaluation of the Historical Theories about Masonry or Stone Arches*. Proc. 1st Int. Conf. On Arch Bridges, Bolton, 1995, 131-142. Fra De la Hire, Castigliano og Coulomb til Heyman, historiske og moderne formuleringer forenet.

Smith F W, Harvey W J, Vardy A E (1990): *Three-hinge analysis of masonry arches*. The Structural Engineering, Vol 68, No 11, June 1990.

Vilnay O, Cheung S (1986): *Stability of Masonry Arches*. Journal of Structural Engineering, vol 112, No 10, October 1986.

Datamaskin-basert analyse av steinhvelv

Boothby T, Domalik D E, Dalal V A (1998): *Service Load Response of Masonry Arch Bridges*. Journal of Structural Engineering, January 1998.

Choo B S, Coutie M G, Gong N G (1990): *Analysis of masonry arch bridges by FEM*. Proc. Forth Rail Bridge Centenary Int. Conf., Edinburgh, Aug. 1990, 381-392.

Choo B S, Coutie M G, Gong N G (1990): *The application of the finite element method to the study of cracking in masonry arch bridges*. Proc. Int. Conf. On Applied Stress Analysis, Nottingham, Aug. 1990, 476-485.

Choo B S, Coutie M G, Gong N G (1991): *Finite-element analysis of masonry arch bridges using tapered elements*. Proc. Inst. of Civ. Engrs, Part 2, 91 (12), 755-770.

Crisfield M A (1984): *A finite element computer program for the analysis of masonry arches*. TRRL, Crowthorne, Laboratory Report 1115, 1984.

Crisfield M A (1985): *Finite element and mechanism methods for the analysis of masonry and brickwork arches*. TRRL, Crowthorne, Report 19, 1995. Flere beregningsmetoder er testet mot resultater fra eksperimenter.

Hughes T G, Vilnay O (1989): *The analysis of masonry arches*. Proc. 8th Int. Brick/Block Masonry Conf., Dublin, 1988, 1311-1318.

Kumar A (1995): *Semiautomatic Approaches for Masonry Arch Assessment*. Proc. 1st Int. Conf. On Arch Bridges, Bolton, 1995, 267-276. Bruk av elastiske analyseprogrammer på steinhvelv demonstreres.

Peng D M, Fairfield C A, Sibbald A (1995): *Finite element analysis of flat arches*. Proc. 1st Int. Conf. On Arch Bridges, Bolton, 1995, 427-435. Kortfattet men ambisiøst om 2D FEM analyse av steinhvelv.

Woolfenden P A (1993): *Modelling the masonry arch: Improving modern bridge assessment using nonlinear finite-element software package (MAFEA)*. Bridge management 2. Thomas Telford, London, 1993.

Målinger og prøvebelastninger

Boothby T, Domalik D E, Dalal V A (1998): *Service Load Response of Masonry Arch Bridges*. Journal of Structural Engineering, January 1998.

Page J (1995): *Load tests for assessment of in-service arch bridges*. Proc. 1st Int. Conf. On Arch Bridges, Bolton, 1995, 299-307.

Materialeegenskaper

Melbourne C, Gilbert M (1993): *A study of the effects of ring separation on the load-carrying capacity of masonry arch bridges*. Bridge management 2. Thomas Telford, London, 1993.

Søyland K, Rosson B T, Boothby T E (1995): *The Influence of Mortar Properties on the System Behavior of Masonry Arch Bridges*. Proceedings of the First International Conference on Arch Bridges held at Bolton, UK on 3-6 September 1995, edited by Prof C. Melbourne (Thomas Telford).

Taylor N, Mallinder P (1993): *The brittle hinge in masonry arch mechanisms*. The Structural Engineer, Vol 71, No 20, 1993. Denne artikkelen diskuterer trykkbrudd for steinhvelv og reviderer idealiserte materialmodeller for trykkpåkjent murverk.

Utforming og estetikk

Wallsgrave J (1995): *The aesthetics of loadbearing masonry arch bridges*. Proceedings of the First International Conference on Arch Bridges held at Bolton, UK on 3-6 September 1995, edited by Prof C. Melbourne (Thomas Telford).

Proceedings of the First Int. Conference on Arch Bridges at Bolton, UK 3-6 sept 1995, redigert av Prof. C. Melbourne (Thomas Telford) er en fyldig dokumentasjon av blant annet analyse, dimensjonering, vurdering og reparasjon av alle typer buebruer. Flere artikler er nevnt over, også andre er relevante for steinhvelvbruer. Fyldige referanselister.

Regelverk for prosjektering av (nye) steinhvelvbruer:

Statens vegvesen: *Håndbok 185. Prosjekteringsregler for bruer*. Siste utgave er fra 1996 med rettinger, endringer og tillegg fra 2001. Prosjekteringsreglene vil bli revidert og utgitt på nytt i 2002, og da vil regler for prosjektering av steinhvelvbruer være inkludert.

Statens vegvesen: *Håndbok 184. Lastforskrifter for bruer og ferjekaier i det offentlige vegnett*. Siste utgave er fra 1995 med rettinger, endringer og tillegg fra 2001. Lastforskriftene vil bli revidert og utgitt på nytt i 2002.

Jernbaneverket: *JD 525. Bruer. Regler for prosjektering og bygging*. Ny utgave 1/1 hvert år. Disse reglene inneholder en del generelle regler, blant annet lastforskrifter, for jernbanebruer men ikke noe spesifikt om steinhvelvbruer.

NBR: *Norsk Standard 3473. Prosjektering av betongkonstruksjoner. Beregnings- og konstruksjonsregler*. 5. utgave november 1998. Betong-standarden er relevant for bestemmelse av materialeegenskaper for mørtel.

Regelverk for klassifisering av (eksisterende) steinhvelvbruer:

Statens vegvesen: *Bruklassifisering. Lastforskrifter for klassifisering av bruer og ferjekaier i det offentlige vegnett*. Disse reglene er revidert og vil bli utgitt på nytt i 2002, sannsynligvis med et vedlegg om klassifisering av steinhvelvbruer.

Department of Transport: *The assessment of highway bridges and structures. Departmental Standard BD 21/97.* London, 1997, og *Departmental Advice Note BA 16/97*, London, 1997. Disse delene av de britiske reglene for prosjektering og klassifisering av bruer inneholder en grundig gjennomgang av forutsetningene for klassifisering av steinhvelvbruer, samt mange henvisninger til relevant vitenskapelig litteratur.

Ontario Ministry of Transportation: *Ontario highway bridge design code.* Ottawa, 1991. Kapittel 11 om klassifisering har konkrete regler om steinhvelvbruer.

Statens vegvesen har mange gamle publikasjoner om steinhvelv:

Flere av Statens vegvesens "Meddelelser fra Veidirektøren" tar for seg viktige sider av steinhvelv-teknologien, blant andre;

- Juni 1915: *Hvelvbroer*
- Juni 1919: *Broanlegget ved Skodjestrømmen*
- Desember 1946: *Hvilken belastning tåler våre hvelvbruer* (av Arne Selberg)

Norsk Vegtidsskrift, bind 43, 1967 nr. 2, hadde en artikkel som heter *Lettvint klassifisering av steinhvelv*, skrevet av Kobbe, Løvmo og Aannerud. Denne er mye brukt i forbindelse med klassifisering og senere oppgradering av gamle steinhvelv.

Statens vegvesen håndbok 182, *Tørrmuring med maskin*, inneholder også en del nyttig stoff.

Fra Jernbaneverket (NSB) sine fylldige arkiver:

Jernbanemuseets årbøker og jubileumsskrift:

- Hektoen P (1981): *Brubygging ved norske jernbaner i de første 30 år*
- Hektoen P (1982): *Brubyggingen ved NSB fra 1890 og frem til 2. verdenskrig.*
- Hektoen P (1985): *Brubyggingen ved NSB under krigen og i de første etterkrigsår.*
- Hektoen P (1991): *Utviklingen av brubyggingen ved NSB, Jernbaingeniørenes avd. 1881-1991.*

Lund S A (1909): *Nyere hvelvbroer av naturlig sten ved Norges Statsbaner.*
A.W.Brøggers Bogtrykkeri, 1909. Særtrykk av Teknisk Ukeblad.

"Meddelelser fra Norges Statsbaner;

- Februar 1926: *Hvælvbro over Vinstra Elv*
- Februar 1926: *Orkla bro*
- Februar 1928: *Kjeosen hvelvbro*
- Juni 1928: *Bro over Kammerfösseleven ved Vafoss st*

Artikkelen om Orkla bro er som et eventyr, levende fortalt og rikt illustrert med flotte bilder og figurer.



Statens vegvesen

Statens vegvesen
Vegdirektoratet
Postboks 8142 Dep
0033 Oslo

Håndbøkene kan bestilles fra:

Statens vegvesen

Vegdirektoratet

Håndbokeekspedisjonen

Postboks 8142 Dep

0033 Oslo

Tlf.: 22 07 35 00

Faks: 22 07 37 68

E-post: firmapost@vegvesen.no

ISBN 82-7207-522-9