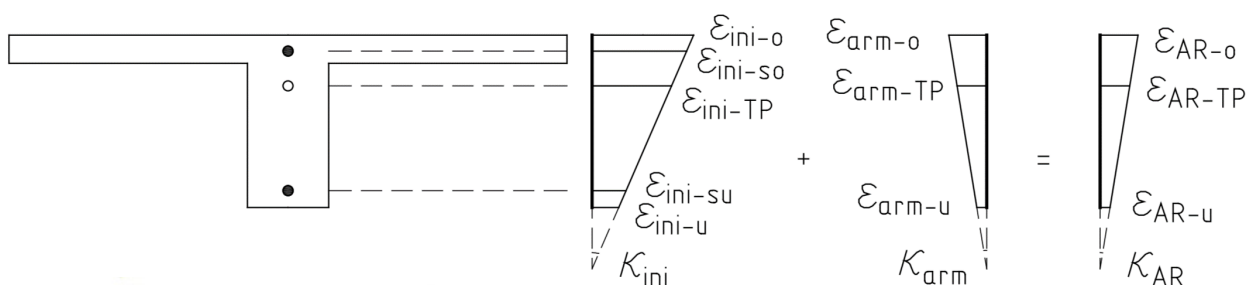


Bæreevneklassifisering av bruer med alkalireaksjoner

FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017–2021

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 855



Tittel

Bæreevneklassifisering av bruer med alkalireaksjoner

Undertittel

FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017–2021

Forfatter

Håvard Johansen

Avdeling

Konstruksjoner

Seksjon

Konstruksjonsteknikk

Prosjektnummer

L10114

Rapportnummer

855

Prosjektleder

Bård M. Pedersen og Eva Rodum

Godkjent av

Bård M. Pedersen

Emneord

Bæreevneklassifisering, bruer, alkalireaksjoner, beregningsveiledning

Sammendrag

Rapporten er en uformell veiledning om hvordan alkalireaksjoner i betong kan ivaretas i forbindelse med bæreevneklassifisering av bruer. Den er utarbeidet i forbindelse med Statens vegvesens FoU-program Bedre bruvedlikehold 2017–2021.

Title

Assessment of bridges with alkali-silica-reactions

Subtitle

The R&D program Improved bridge maintenance 2017-2021

Author

Håvard Johansen

Department

Structures

Section

Structural Engineering

Project number

L10114

Report number

855

Project manager

Bård M. Pedersen and Eva Rodum

Approved by

Bård M. Pedersen

Key words

Assessment, bridges, alkali-silica-reactions, guidelines

Summary

The report provides informal guidelines to assessment of concrete bridges with alkali-silica-reactions. It has been issued as part of the R&D Programme Improved bridge maintenance 2017–2021.



Innhold

1	Innledning	1
2	Bæreevneklassifisering av bruere og alkalireaksjoner	1
2.1	<i>Bæreevneklassifisering</i>	<i>1</i>
2.1.1	Begreper	1
2.1.2	Regelverk	1
2.1.3	Grunnlag for konstruksjonsberegninger	2
2.2	<i>Beregningsmessige konsekvenser av alkalireaksjoner</i>	<i>2</i>
2.3	<i>Alkalireaksjoner i konstruksjonsberegninger</i>	<i>2</i>
2.3.1	Ekspansjonens variasjon	2
2.3.2	Alkalireaksjoner og svinn	2
2.3.3	Motstand mot AR-ekspansjon og opptredende AR-ekspansjon	3
2.3.4	Undersøkelser av konstruksjonen	3
2.3.5	AR-ekspansjon i elastiske analyser	3
2.3.6	Modellering av AR i elastiske analyser	4
2.3.7	Materialegenskaper for betong med alkalireaksjoner	5
2.3.8	Innledende analyser og følsomhetsvurderinger	5
2.4	<i>Elastiske analyser</i>	<i>5</i>
2.4.1	Rammeanalyser	5
2.4.2	FEM-analyser	5
2.5	<i>Tverrsnittskontroller</i>	<i>6</i>
2.5.1	Momentkapasitet	6
2.5.2	Skjærkapasitet	6
2.6	<i>Ikkelineære analyser</i>	<i>6</i>
3	Rammeanalyser av bruoverbygning med alkalireaksjoner	7
3.1	<i>Innledning og oppsummering</i>	<i>7</i>
3.2	<i>AR-ekspansjon i en fritt opplagt bjelke</i>	<i>8</i>
3.3	<i>AR-ekspansjon i en kontinuerlig bjelke</i>	<i>10</i>
3.4	<i>Beregningsprosedyre for AR-effekter i en brubjelke</i>	<i>12</i>
3.4.1	Innledning	12
3.4.2	AR-effekter i analysen	12
3.4.3	AR-effekter i tverrsnittskontrollene	14
3.5	<i>Tverrsnittsegenskaper</i>	<i>16</i>
4	Andre beregningsmessige konsekvenser av alkalireaksjoner	17
4.1	<i>Innledning</i>	<i>17</i>
4.2	<i>Vegger</i>	<i>17</i>
4.3	<i>Søyler og tårn</i>	<i>17</i>
4.4	<i>Komplekse bæresystemer eller brutvernsnitt</i>	<i>18</i>
4.5	<i>Konsekvenser av at bruas bæresystem endres på grunn av AR</i>	<i>19</i>
4.6	<i>Delaminering av dekker</i>	<i>20</i>
5	Litteratur	21

Forord

Denne rapporten er utarbeidet innenfor Statens vegvesens FoU-program Bedre bruvedlikehold (2017-2021). Bedre bruvedlikehold har vært ledet av Bård M. Pedersen og har hatt som målsetting å bidra til at Statens vegvesen i større grad skal kunne optimalisere ressursbruken knyttet til inspeksjon, vedlikehold og forvaltning av bruer.

Bedre bruvedlikehold har bestått av fire prosjekter:

Prosjekt 1: Forvaltningsverktøy for bruer

Prosjekt 2: Armeringskorrosjon i betong

Prosjekt 3: Alkalireaksjoner i betong

Prosjekt 4: Vedlikehold av stålbruer

Prosjekt 3 Alkalireaksjoner i betong har vært ledet av Eva Rodum. Prosjektets målsetting har vært å utvikle beregningsveiledninger, metodikk for å kvantifisere graden av ekspansjon og degradering av mekaniske egenskaper, samt utrede effekten av ulike vedlikeholdstiltak, for betongbruer med alkalireaksjoner.

Denne rapporten er knyttet til delprosjekt 3.1 *Konstruktive konsekvenser av alkalireaksjoner* og er en uformell veiledning om hvordan alkalireaksjoner i betong kan ivaretas i forbindelse med bæreevneklassifisering av bruer. Rapporten er skrevet av Håvard Johansen.

1 Innledning

Denne rapporten er en veiledning om hvordan alkalireaksjoner i betong kan ivaretas i forbindelse med bæreevneklassifisering av bruer.

I kapittel 2 gjennomgås en del generelle forutsetninger. I kapittel 3 er det foreslått en prosedyre for hvordan alkalireaksjoner kan tas hensyn til i elastisk rammeanalyse og kontroll av momentkapasitet for en bruoverbygning. Målsettingen med prosedyren er å legge til rette for en praktisk gjennomføring som i mange tilfeller er nøyaktig nok. Kapittel 4 tar for seg noen situasjoner og problemstillinger som kan være aktuelle ved beregninger av bruer med alkalireaksjoner.

Bruas tilstand, iverksatte og planlagte tiltak og beregninger må alltid ses i sammenheng. Denne veiledningen er derfor nært knyttet til Statens vegvesen rapport 852 *Inspeksjon av bruer med alkalireaksjoner. Felt- og laboratorieundersøkelser /2/*, som også er lansert i forbindelse med *Bedre bruvedlikehold*.

2 Bæreevneklassifisering av bruer og alkalireaksjoner

2.1 Bæreevneklassifisering

2.1.1 Begreper

I denne veiledningen brukes følgende forkortelser og begreper:

- *AR*: Alkalireaksjoner.
- *Bæreevneklassifisering*: Den formelle prosessen som innebærer å dokumentere hvilke trafikklaste ei eksisterende bru kan belastes med. I praksis: kontroll av bruas kapasitet for gitte laster.
- *Lastvirkninger*: Krefter og momenter i et tverrsnitt.
- *Analyser*: Prosessen å bestemme lastvirkninger, også omtalt som *statiske beregninger*.
- *Kapasitetskontroller*: Tverrsnittskontroller, også omtalt som *dimensjonering*.

2.1.2 Regelverk

Regler for bæreevneklassifisering av bruer finnes i vegnormal N400 *Bruprosjektering*, kapittel 13 *Bruer i driftsfasen*, først og fremst i kapittel 13.1 og 13.2.

Ekvivalentlaste for trafikklaste, grunnlag for fastsettelse av øvrige laste, lastkoeffisienter og lastkombinasjoner er gitt i Statens vegvesens veiledning V412 *Bæreevneklassifisering av bruer, laste*.

Materialparametere og materialkoeffisienter finnes i Statens vegvesens veiledning V413 *Bæreevneklassifisering av bruer, materialer*.

Dimensjonerende lastvirkninger kontrolleres mot dimensjonerende kapasiteter beregnet i samsvar med NS-EN 1992 (*Eurokode 2*). For betongruer prosjektert før NS-EN 1992 ble gjeldende, kan NS 3473, 6. utgave 2003, benyttes for beregning av dimensjonerende skjærkapasitet.

2.1.3 Grunnlag for konstruksjonsberegninger

Kvaliteten på beregninger av eksisterende bruer er avhengig av et godt beregningsgrunnlag. Dette kan være for eksempel regelverk benyttet ved opprinnelig prosjektering, arbeidstegninger, materialdata, registreringer i Brutus og kunnskap om tilstand og slitelagstykkelse.

For bruer med alkalireaksjoner er det i tillegg viktig å gjennomføre en spesialinspeksjon med formål å dokumentere skadeårsak og kartlegge variasjoner i skadegrad/ekspansjon over konstruksjonens ulike elementer og over ulike tverrsnitt. En veiledning i hvordan en slik spesialinspeksjon bør gjennomføres er gitt i /2/.

2.2 Beregningsmessige konsekvenser av alkalireaksjoner

Prinsipielt betraktet vil de viktigste beregningsmessige konsekvensene av alkalireaksjoner vanligvis være:

- *Direkte konsekvenser av betongens AR-ekspansjon på lastvirkningene:*
 - Virkninger av at betongen ekspanderer og armeringen holder igjen
 - Tvangskrefter på grunn av ekspansjon i statisk ubestemt system
- *Konsekvenser av at bruas bæresystem endres på grunn av AR-ekspansjon:*

Bæresystemets opplagerbetingelser (og dermed analysemodellens grensebetingelser) kan endres, for eksempel fordi en fuge lukkes og det mobiliseres passivt trykk mot en bruende eller fordi et glidelager skyves ut av stilling slik at horisontalkrefter overføres.
- *Konsekvenser av at betongens fysiske og mekaniske egenskaper endres på grunn av AR:*

AR medfører at betongen ekspanderer og risser opp, og konsekvensen kan være for eksempel redusert strekkfasthet, E-modul og trykkfasthet.

Alkalireaksjoner vil med andre ord kunne medføre både *økte lastvirkninger* og *redusert kapasitet*. Denne veiledningen fokuserer på det første strekpunktet.

2.3 Alkalireaksjoner i konstruksjonsberegninger

2.3.1 Ekspansjonens variasjon

Ekspansjon på grunn av alkalireaksjoner kan variere mellom ulike deler av ei bru, for eksempel på grunn av forskjeller i fukttilgang eller forskjeller i betongsammensetning (masseforhold, sementmengde og tilslagsammensetning). I noen tilfeller kan denne variasjonen være viktig, for eksempel for spesielt lange bruer med mange spenn, der det er viktig å vite hvor ekspansjonen er størst. I andre tilfeller er den resulterende ekspansjonen viktigere, for eksempel for bruer der tilstanden til en fuge i den ene bruenden er hovedfokus.

For en brubjelke kan ekspansjonen være lik i hele tverrsnittet, men den kan også variere både vertikalt og horisontalt, for eksempel på grunn av varierende fukttilgang. Man kan også regne med ekspansjon bare i deler av tverrsnittet, for eksempel bare i ei bruplate og ikke i underliggende bjelker. Dette er forklart i Statens vegvesen rapport 601 *Alkalireaksjoner – Veiledning for konstruktiv analyse* /1/. Se også kapittel 2.4.2 FEM-analyser .

2.3.2 Alkalireaksjoner og svinn

I beregninger av armert betong kan alkalireaksjoner og svinn på mange måter betraktes som like effekter, men med motsatte fortegn – og ofte ulik størrelsesorden. Betongens svinntøyninger kan imidlertid være fordelt og orientert annerledes enn AR-tøyningene. Svinntøyningene er også størst i tidlig fase, mens AR-tøyninger utvikles senere. Når AR er så langt utviklet at konstruksjonen har

fått vesentlig ekspansjon, vil det være riktig å regne svinn og AR i samme bidrag og tenke at det vi kaller AR-ekspansjon, i virkeligheten representerer AR minus irreversibelt svinn.

2.3.3 Motstand mot AR-ekspansjon og opptredende AR-ekspansjon

En uarmert og ubelastet betongterning med alkalireaksjoner vil kunne ekspandere fritt og like mye i alle retninger. I en virkelig betongkonstruksjon vil AR-ekspansjon derimot møte varierende grad av motstand. Motstanden kommer til uttrykk som betongtrykkspenninger, og der betongen har trykkspenninger, vil AR-ekspansjonen i trykkspenningenes retning bli mindre enn en fri ekspansjon.

Betongtrykkspenninger, og dermed motstand mot AR-ekspansjon, kan mobiliseres av flere grunner.

1. Konstruksjonsdeler kan stå med permanente trykkspenninger på grunn av last på selve konstruksjonsdelen eller lastvirkninger fra tilstøtende konstruksjonsdeler. Ei betongsøyle er eksempel på en konstruksjonsdel som står med så store permanente vertikale betongtrykkspenninger at vertikal AR-ekspansjon er lite sannsynlig.
2. Når betongen ekspanderer og armeringen holder igjen ekspansjonen, så oppstår strekkspenninger i armeringen og trykkspenninger i betongen. Motstanden vil være størst der armeringsmengden er størst.
3. Når armert betong ekspanderer i et statisk ubestemt system, så oppstår det tvangskrefter i systemet. Dette kan være aksialkrefter som gir betongtrykkspenninger i hele tverrsnittet eller bøyemomenter som gir betongtrykkspenninger i deler av tverrsnittet.

Opptredende AR-ekspansjon i for eksempel en bruoverbygning er med andre ord en tøyningstilstand som kan variere mellom ulike deler av brua, i ulike retninger og over tverrsnittene.

2.3.4 Undersøkelser av konstruksjonen

Opptredende AR-ekspansjon kan anslås på grunnlag av målinger eller andre undersøkelser av brua.

- I noen tilfeller kan resulterende ekspansjon over en lengde anslås ved å måle for eksempel lagerforskyvninger eller fugeåpninger. Der man kjenner innstillinger/åpninger ved installasjon, vil målte innstillinger/åpninger kunne gi relativt sikre anslag for AR-ekspansjon i bruas lengderetning.

- Der resulterende ekspansjon ikke kan måles, eller for å anslå variasjoner i ekspansjonsnivå over ulike konstruksjonsdeler og over tverrsnittene, vil det være behov for både feltundersøkelser og uttak av kjerner for laboratorieundersøkelser.

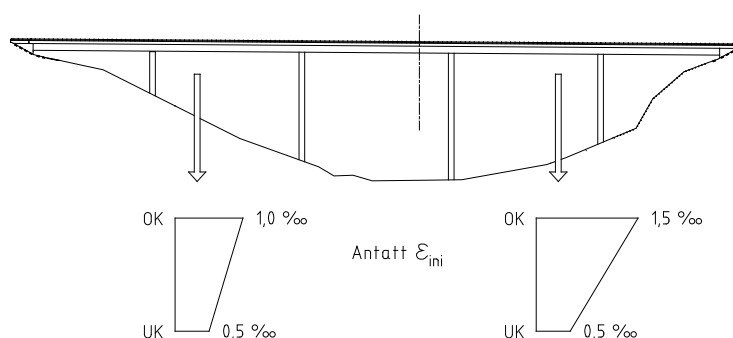
I Statens vegvesen rapport 852 *Inspeksjon av bruer med alkalireaksjoner. Felt- og laboratorieundersøkelser /2/* er det gitt en beskrivelse av ulike laboriemetoder som kan være aktuelle til dette formålet – og eksempler på bruk av metodene. Det vil alltid være nødvendig å sammenholde resultater fra flere felt- og laboratorieundersøkelser, og lokaliteter for prøveuttak bestemmes på bakgrunn av visuelle observasjoner, forventede variasjoner i fuktforhold og eventuelle variasjoner i betongsammensetning. Vurdering av resultater fra undersøkelser kan være vanskelig, og erfaring fra tilsvarende prosjekter er viktig. Inspeksjoner må planlegges i samarbeid mellom personer med material- og konstruksjonskompetanse. Innledende beregninger kan være nyttig for å kartlegge hvilke områder eller konstruksjonsdeler som er viktigst for bæreevneklassifiseringen.

2.3.5 AR-ekspansjon i elastiske analyser

En fiktiv ekspansjonsfordeling, en initiell tøyningstilstand for ulike deler av brua, danner utgangspunktet for beregninger av større konstruksjonsdeler av armert betong. Størrelse og fordeling for en slik initiell AR-tøyning må velges innledningsvis, og valget må ivareta både

variasjoner på grunn av forskjellig betongsammensetning og/eller varierende fukttilgang (se kapittel 2.3.1) og forventet motstand mot ekspansjonen (se kapittel 2.3.3).

For ei kontinuerlig bru kan antatt initiell ekspansjon være for eksempel som vist i Figur 1 nedenfor.



Figur 1 Antatt initiell AR-ekspansjon

Figuren illustrerer en situasjon der resultater fra spesialinspeksjon har vist at venstre og høyre del av brua er utført med forskjellig betong, med mer reaktivt tilslag i høyre del enn i venstre, samt at det er målt større fuktinnhold i øvre del av overbygningen enn i nedre del.

Beregningsgangen blir deretter slik:

Antatt initiell AR-ekspansjon

÷ motstand fra armeringen (bestemmes i Excel/MathCad i forkant av analysen)

= **AR-ekspansjonen (AR-lasten) som modelleres i analysen**

÷ motstand på grunn av tvang i statisk ubestemt system (ivaretas i analysen)

= **Opptredende AR-ekspansjon**

Opptredende AR-ekspansjon i beregningene (analysen) kontrolleres mot målt eller antatt opptredende ekspansjon i konstruksjonen. Dersom beregningsresultatene ikke stemmer med målinger eller antagelser, så justeres antatt initiell AR-ekspansjon, og prosessen kjøres på nytt.

Dette er gjennomgått i detalj i kapittel 3.4.

2.3.6 Modellering av AR i elastiske analyser

AR-ekspansjon for betong kan betraktes på samme måte som ekspansjon på grunn av en temperaturøkning. Alkalireaksjoner kan derfor også modelleres i analyser på samme måte som en termisk påvirkning. Den omtales i denne veiledningen som *AR-lasten*.

Både jevnt fordelt temperaturøkning og vertikal temperaturgradient vil som regel være nødvendig for å modellere AR. Dette er forklart nærmere i kapittel 3.4. Der alkalireaksjoner varierer også horisontalt i konstruksjonsdelens tverretning vil i tillegg horisontal temperaturgradient være nødvendig.

Det vil som regel være riktig å gi AR-lasten lastfaktor 1,0 i dimensjonerende lastkombinasjoner, på samme måte som deformasjonslasten som kryp/svinn, setningsdifferanser og tidsavhengige spennkrafttap.

2.3.7 Materialeegenskaper for betong med alkalireaksjoner

Materialparametere og materialkoeffisienter for upåvirket betong finnes i Statens vegvesens veiledning V413 *Bæreevneklassifisering av bruer, materialer*. Materialeegenskapene for betongen (og armeringen) i den aktuelle konstruksjonen vil være påvirket av det miljøet de har vært eksponert for. AR påvirker som regel materialeegenskapene (og beregningene) slik:

- Redusert strekkfasthet
- Redusert E-modul
- Redusert trykkfasthet

Redusert strekkfasthet har ingen beregningsmessig betydning for momentkapasiteten i et snitt med gitt armering, siden kapasitetskontrollen uansett er basert på tverrsnitt i stadium III uten strekkfasthet. Redusert strekkfasthet gir imidlertid økte forankringslengder og redusert skjærkapasitet.

E-modulen i analysen påvirker i liten grad lastvirkningene dersom den velges lik i hele konstruksjonen, men AR-laster gitt som temperaturlaster i en analyse må tilpasses valgt E-modul.

Redusert trykkfasthet har betydning for momentkapasiteten der trykksonen er fullt utnyttet. Dette kan være tilfelle for eksempel i en bjelke over et opplegg, der momentet er negativt (strekk i overkant). I felt er dette sjelden en aktuell problemstilling, siden momentet er positivt (strekk i underkant) og fordi trykkflensen, bruplata, har stort betongareal.

2.3.8 Innledende analyser og følsomhetsvurderinger

Innledende analyser av brua uten AR-effekter er viktig som referanse.

Det er ofte betydelige usikkerheter knyttet til AR-ekspansjonens størrelse og variasjon, materialeegenskaper og bruas tilstand, og derfor vil det som regel være nødvendig å kjøre flere analyser med ulike forutsetninger for alkalireaksjoner. Viktige parametere kan varieres for å kartlegge hvilken betydning de har. Slike følsomhetsvurderinger vil vise hvilke forutsetninger eller egenskaper som må undersøkes ekstra nøye.

2.4 Elastiske analyser

2.4.1 Rammeanalyser

Bæreevneklassifisering av bruer som har hovedbærevirkning som bjelker, analyseres enklest – og ofte best – med elastiske rammeanalyser med bjelkeelementer. Dette gjelder bruer med T-tverrsnitt eller kassetverrsnitt, og det gjelder platebruer med relativt stor spennvidde i forhold til brubredde og tverrsnitt med relativt liten bredde i forhold til høyde.

Rammeanalyser gir som regel enkle og oversiktlige analysemodeller. AR-lasten kan varieres i bruas lengderetning, og den kan gis en vertikal og/eller horisontal lineær variasjon over tverrsnittet. Dette vil i mange tilfeller være nøyaktig og riktig nok.

2.4.2 FEM-analyser

Platebruer med liten spennvidde i forhold til brubredde og tverrsnitt med liten høyde i forhold til bredde vil med fordel kunne analyseres med FEM-analyser med skallelementer. Dette gir en vesentlig mer komplisert modell enn en rammeanalyse. Den vil være mer krevende å etablere, kvalitetssikre og kjøre, men i noen tilfeller vil det likevel være et riktig valg. En slik modell gir litt utvidede muligheter til å ivareta AR-virkninger på en nøyaktig måte.

En modell med bruplate med skallelementer og bjelker (steg) med underliggende bjelkeelementer vil for eksempel kunne modelleres med AR bare i bruplata. Dette tilsvarer modell 2 i Statens

vegvesen rapport 601 *Alkalireaksjoner – Veiledning for konstruktiv analyse /1/*, kapittel 4.3.3. I en skallmodell kan vertikale lastvirkninger på grunn av armeringens motstand mot ekspansjon som regel ivaretas på en relativt enkel og oversiktlig måte.

For massive konstruksjoner eller konstruksjonsdeler kan FEM-analyser med volumelementer være nødvendig. Volumelementer kan i noen tilfeller benyttes sammen med bjelkeelementer eller skallelementer for å modellere representative stivheter i D-regioner.

2.5 Tverrsnittskontroller

2.5.1 Momentkapasitet

Kapasitet for dimensjonerende bøyemoment i bruddgrensetilstand kontrolleres på vanlig måte med et program eller med håndregning. I tilfeller med betydelig aksialkraft kan M/N-diagrammer benyttes. Det kan i noen tilfeller være aktuelt å ta hensyn til en initialtøyning i armeringen på grunn av AR-ekspansjonen i betongen, se kapittel 3.4.3, men som regel påvirker ikke dette resultatet på annen måte enn litt økt armeringstøyning.

Alkalireaksjonene kan ha påvirket betongen slik at strekkfastheten er redusert. Dette har ingen betydning i en tverrsnittskontroll av bøyning i stadium III, der betongen uansett regnes å ikke ta strekk. Trykkfastheten kan også være redusert. Dette kan påvirke momentkapasitet, men som regel har redusert trykkfasthet relativt liten betydning.

2.5.2 Skjærkapasitet

Kapasitet for dimensjonerende skjærkraft og torsjonsmoment i bruddgrensetilstand kontrolleres på vanlig måte etter NS-EN 1992 eller NS 3473. Redusert trykkfasthet og/eller strekkfasthet på grunn av alkalireaksjoner vil kunne påvirke skjærkapasiteten.

2.6 Ikkelineære analyser

I noen tilfeller kan ikkelineære analyser være nødvendig for å kartlegge konsekvenser av AR, for eksempel for bruer med spesielt kompliserte bæresystemer eller marginal bæreevne. Det er da *materialegenskapene* som er ikkelineære.

Ikkelineære analyser kan brukes til å bestemme lastvirkninger for dimensjonerende lastkombinasjoner mer nøyaktig enn med elastiske analyser. I så fall kontrolleres kapasitet på samme måte som ved elastiske analyser. Ikkelineære analyser kan også kjøres til brudd, og da bestemmes i praksis kapasiteten av siste lastnivå med likevekt (konvergens).

Mange FEM-programmer har avanserte materialmodeller for betong, men modellene mangler gjerne AR-effektene. En materialmodell for analyse av betong med alkalireaksjoner er utviklet av Simen Sørgaard Kongshaugs i forbindelse med hans PhD-avhandling /3/. Denne modellen ivaretar både spenningsavhengig AR-ekspansjon, AR-avhengig stivhetsreduksjon, redusert strekkfasthet, opprissing, kryp og knusing i samme modell. Slike verktøy vil kunne bidra til mer nøyaktig bestemmelse av AR-lastvirkninger – og dermed også større bæreevne enn det man finner med enklere og mer konservative analyser og kontroller. De vil også gi verdifull informasjon om tøyninger, spenninger, rissmønstre og andre viktige egenskaper ved konstruksjonen for ulike lastnivå.

3 Rammeanalyser av bruoverbygning med alkalireaksjoner

3.1 Innledning og oppsummering

Med utgangspunkt i prinsippene beskrevet i kapittel 2 lanseres i dette kapitlet en prosedyre for hvordan direkte konsekvenser av alkalireaksjoner (første strekpunkt i kapittel 2.2) kan tas hensyn til i elastisk rammeanalyse og kontroll av momentkapasitet for en bruoverbygning.

AR-ekspansjonen antas å være uniform eller vertikalt lineært varierende over tverrsnittet, tilsvarende modell 1 i Statens vegvesen rapport 601 *Alkalireaksjoner – Veiledning for konstruktiv analyse /1/*, kapittel 4.3.

For en brubjelke av slakkarmert betong fører AR til at betongen ekspanderer i lengderetningen mens armeringen *ikke* ekspanderer. Metodikken for å bestemme bidraget fra AR til lastvirkningene kan forklares slik:

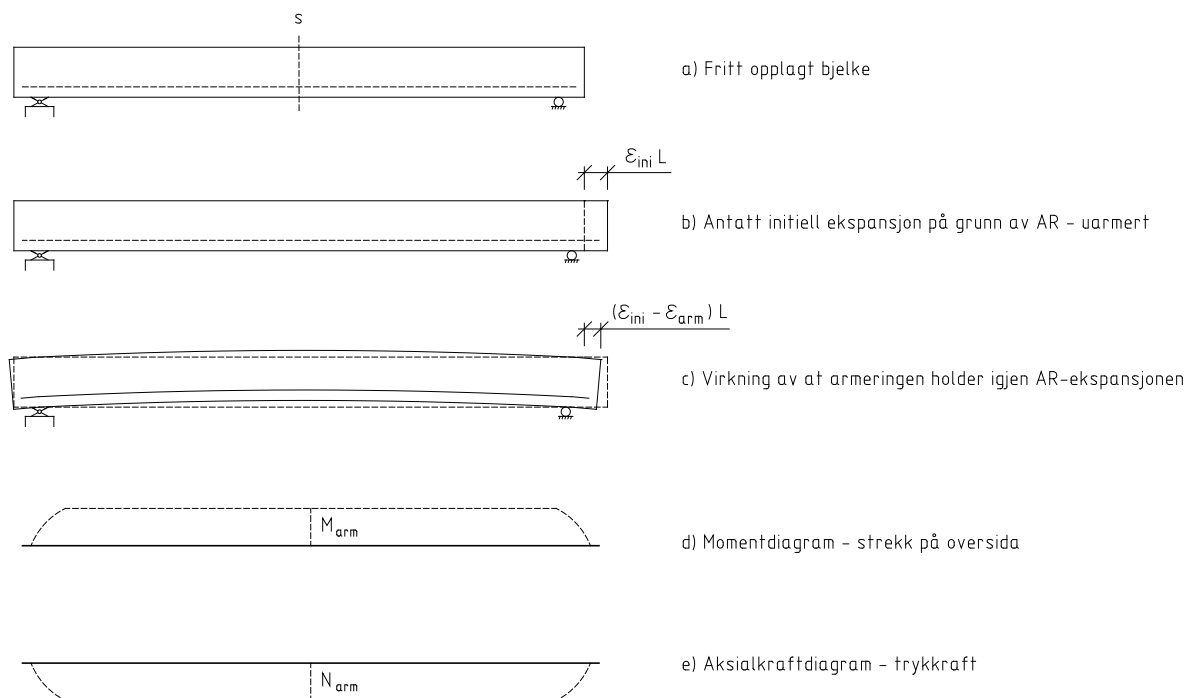
1. Først betraktes en tenkt situasjon med initiell ekspansjon av uarmert betong. I prosedyren får denne fasen indeks *ini*, og tøyningene i bruas lengderetning kalles ϵ_{ini} . Antatt tøyningfordeling ϵ_{ini} må ivareta både variasjoner på grunn av forskjellig betongsammensetning og/eller varierende fukttilgang (se kapittel 2.3.1) og forventet motstand mot ekspansjonen (se kapittel 2.3.3).
2. Ekspansjonen fører til at armeringen får strekktøyninger og betongen får trykktøyninger. Dette har to konsekvenser:
 - a. Brubjelkens ekspansjon reduseres til noe som er mindre enn initiell ekspansjon. Reduksjonen, armeringsbidraget, får indeks *arm*, og tøyningsreduksjonen i bruas lengderetning kalles ϵ_{arm} . Brubjelkens AR-ekspansjon blir dermed $\epsilon_{AR} = \epsilon_{ini} - \epsilon_{arm}$. Denne ekspansjonen modelleres som en temperaturlast i analysen, «AR-lasten».
 - b. Betongen får trykkspenninger, og armeringen får strekkspenninger. Spenningsresultantene mobiliserer moment og aksialkraft i tverrsnittene. Effektene ivaretas som initialtøyninger i armeringen i tverrsnittskontrollene.
3. I statisk ubestemte systemer gir brubjelkens påførte ekspansjon ϵ_{AR} , AR-bidraget, tvangskrefter. I prosedyren får denne effekten indeks *tvang*. I statisk bestemte systemer (fritt opplagte bjelker) oppstår ikke tvangskrefter.

Som en konsekvens av brubjelkens ekspansjon kan for eksempel lagre skyves utenfor sitt virkeområde, ødelegges og slutte å virke slik de skal. En annen vanlig følge er at fuger lukkes, brubjelken trykker mot tilstøtende konstruksjonsdeler, for eksempel landkar, og ekspansjonen gir trykk i bjelken. I slike tilfeller vil bruas bæresystem være forandret, og dette kan medføre at grensebetingelsene i analysemodellen må revideres. Hvilke effekter som vil opptre, hvordan de vil virke og hvor mye de påvirker lastvirkninger og momentkapasitet vil imidlertid være helt avhengig av den aktuelle brua.

Prinsippene er først illustrert for en fritt opplagt (statisk bestemt) bjelke i kapittel 3.2, deretter for en kontinuerlig (statisk ubestemt) bjelke i kapittel 3.3, før beregningsprosedyrer er gjennomgått i kapittel 3.4.

3.2 AR-ekspansjon i en fritt opplagt bjelke

AR-ekspansjonen kan illustreres ved å betrakte en enkel fritt opplagt bjelke med konstant armering i underkant, se Figur 2a) nedenfor.



Figur 2 Fritt opplagt bjelke med alkalireaksjon

Figur 2b) viser en tenkt situasjon med bjelken med initiell ekspansjon, som om den var uarmert. Ekspansjonen vises her som antatt uniform med verdi ϵ_{ini} , lik over hele tverrsnittshøyden og i hele bjelkens lengde. Bjelkens høyre ende (bevegelig ende) har forskjøvet seg mot høyre en avstand $\epsilon_{ini} L$, der L er bjelkens lengde. I denne tenkte situasjonen er betongen spenningsfri.

Armeringen får strekk, og på grunn av heft mellom betong og armering virker denne strekkrafta på betongen slik at betongen får trykkspenninger. Figur 2c) viser bjelkens deformasjon når strekkrafta fra armeringen virker på betongen, som en trykkraft i nedre del. Virkningen kan sammenlignes med en bjelke med spennarmering i nedre del.

Figur 2d) og e) viser momentdiagram og aksialkraftdiagram på grunn av armeringens bidrag. Kurvenes form på endene viser effekten av kraftinnføringen i armeringen på endene.

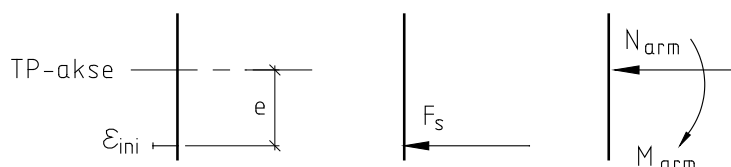
I en analyse vil ikke ekspansjonen gi tvangskrefter, bare deformasjoner.

Bæreevneklassifisering av bruer med alkalireaksjoner

FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017-2021

Kapasitetskontroller utføres i praksis med et dimensjoneringsprogram, men prinsippene gjennomgås likevel her. Se også Svein Sørensen: *Betongkonstruksjoner – Beregning og dimensjonering etter Eurokode 2 /4/*.

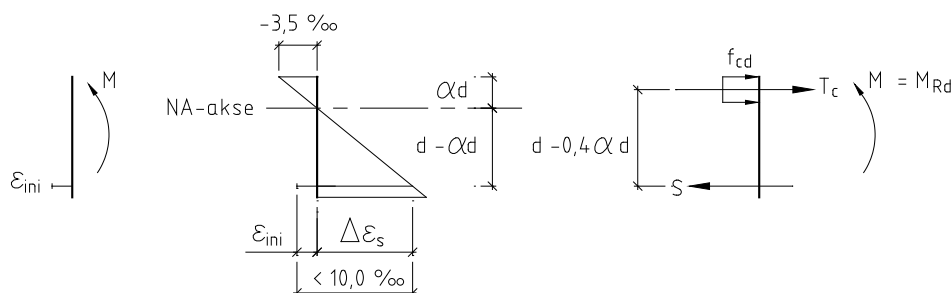
I Figur 3 ser vi på snitt S i bjelken. Utgangspunktet tenkes å være tøyningstilstanden etter initiell ekspansjon. Da er betongtøyningene null (ingen spenningsgivende tøyninger) og armeringstøyningen ε_{ini} .



Figur 3 Krefter fra armeringen i snitt S

Krafta i armeringen blir $F_s = \varepsilon_{ini} E_s A_s$, og den kan antas å virke på tverrsnittet i nivå med armeringen. Denne situasjonen tilsvarer aksialkrafta $N_{arm} = F_s$ i TP-aksen og momentet $M_{arm} = N_{arm} e$. Disse lastvirkningene tilsvarer N_{arm} og M_{arm} i Figur 3.

Vi ser så i Figur 4 på kontroll av momentkapasitet i stadium III på tradisjonell måte.



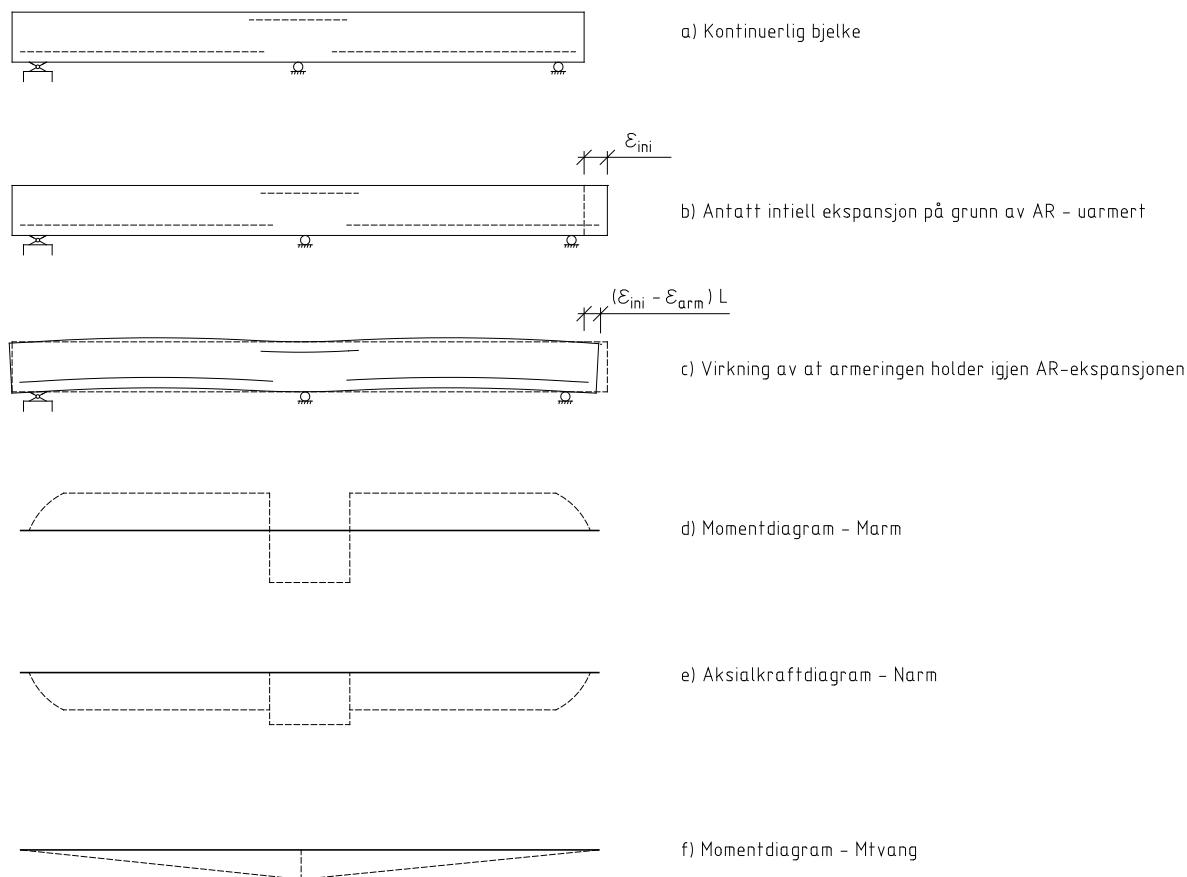
Figur 4 Kontroll av momentkapasitet i snitt S

Armeringsbidraget ivaretas ved initialtøyningen ε_{ini} , på samme måte som om vi hadde spennarmering. Største betongtrykktøyning settes lik $-3,5 \text{ ‰}$, og armeringen antas å ha nådd flytetøyning, $S = f_{sd} A_s$. Trykksonehøyde og spenningsresultanter bestemmes ved kraftlikevekt, $S = T_c$, der $T_c = 0,8 \alpha d B f_{cd}$, og momentkapasiteten bestemmes ved $M_{Rd} = T_c (d - 0,4 \alpha d)$. Til slutt kontrolleres at samlet armeringstøyning, $\varepsilon_{ini} + \Delta \varepsilon_s$, ikke er større enn en valgt tøyningsgrense, for eksempel 10 ‰ .

I bruddgrensetilstand flyter armeringen enten AR har virket eller ikke, og initialtøyningen har derfor ikke så stor betydning for kapasiteten. Gjennomgangen illustrerer imidlertid prinsippet for hvordan AR kan ivaretas i tverrsnittskontrollen.

3.3 AR-ekspansjon i en kontinuerlig bjelke

Vi ser så på et statisk ubestemt system med AR-ekspansjon i en kontinuerlig bjelke med armering i underkant i felt og i overkant over støtte, se Figur 5a) nedenfor.



Figur 5 Kontinuerlig bjelke med AR

Figur 5b) viser en tenkt situasjon med bjelken med initiell ekspansjon, som om den var uarmert, og Figur 5c) viser bjelkens deformasjon når strekkrafta fra armeringen virker på betongen. Her krummer bjelken oppover i felt, der armeringen ligger i underkant, og nedover over søyla, der armeringen ligger i overkant. Figur 5d) og e) viser moment og aksialkraft fra armeringens bidrag. Diagrammene er idealisert i overgangen mellom underkantarmering og overkantarmering, og aksialkraft-spranget illustrerer at overkantarmeringen er litt større enn underkantarmeringen.

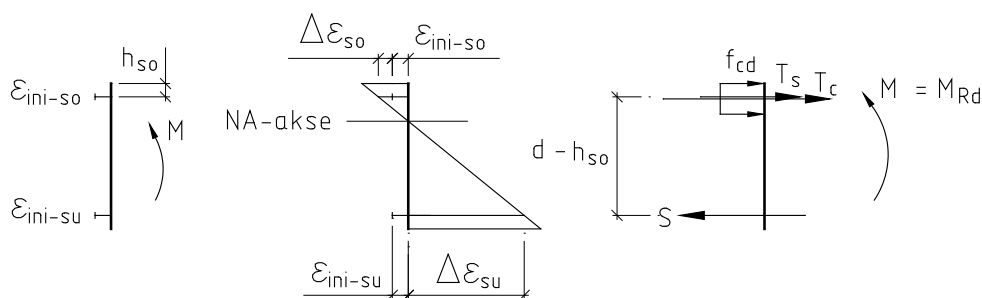
Søyla holder igjen bjelkens vertikale krumning på grunn av armeringsbidraget, og dette gir tvangsmomentet i Figur 5f). Dette er et *tvangsmoment på grunn av AR*, og det vil framkomme som en lastresultant i analysen.

Bæreevneklassifisering av bruer med alkalireaksjoner

FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017-2021

Tverrsnittskontrollen for den kontinuerlige bjelken (statisk ubestemt system) blir tilsvarende den fritt opplagte bjelken. Forskjellen er at tvangskreftene inngår i dimensjonerende lastvirkninger fra analysen som kapasiteten skal kontrolleres mot.

For oversiktens skyld ser vi på en vanlig situasjon med armering både på trykksida og strekksida. Tøyningsforutsetningene for armert betongtverrsnitt i stadium III er som vist i Figur 4, med $-3,5\%$ på trykkrand og med tøyningsgrense 10% for armeringen. I likevektskontrollen må imidlertid armeringen på trykksida være med, og da blir tverrsnittskontrollen som vist i Figur 6 nedenfor.



Figur 6 Kontroll av momentkapasitet for tverrsnitt med strekkarmering og trykkarmering

Her ser vi på kapasiteten for positivt moment, strekk i underkant. Armeringens initielle tøyninger er:

- ε_{ini-so} for overkantarmeringen (trykkarmeringen)
- ε_{ini-su} for underkantarmeringen (strekkarmeringen)

På strekksida blir situasjonen som i Figur 4. På trykksida må bidraget fra overkantarmeringen legges til i likevekten, og da er det viktig å passe på om den antatte tøyningstilstanden ($-3,5\%$ på trykkrand) gir positiv eller negativ tøyning i armeringen.

Figur 6 viser et tilfelle der tøyningen i overkantarmeringen (trykkarmeringen) i stadium III er mer negativ enn initialtøyningen. Det betyr at overkantarmeringen har trykkspenninger, og armeringens kraft i likevektskontrollen blir $T_s = \Delta\varepsilon_{so} E_s A_{so}$. Hadde initialtøyningen vært større, $|\varepsilon_{ini-so}| > |\Delta\varepsilon_{so}|$, ville krafta fra armeringen hatt motsatt retning. T_c blir som i Figur 4.

3.4 Beregningsprosedyre for AR-effekter i en brubjelke

3.4.1 Innledning

Forklaringene og skissene i foregående avsnitt er forenklede og ment for å illustrere konsekvensene av AR. I det følgende er en beregningsprosedyre for å bestemme AR-bidrag i analyser og ved kontroll av momentkapasitet for et enkelt T-tverrsnitt gjennomgått.

3.4.2 AR-effekter i analysen

(a) For hvert tverrsnitt/element i hele bruas lengde:

1. Tverrsnittet kartlegges

Elastiske tverrsnittsegenskaper og materialegenskaper bestemmes:

- H, B_f, B_b = høyde, flensbredde og bjelkebredde (stegbredde)
- h_{o-EL}, h_{u-EL} = tyngdepunkt-plassering
- A_{EL}, I_{EL} = areal og arealtreghetsmoment
- E, α = E-modul og temperaturutvidelseskoeffisient i analysen

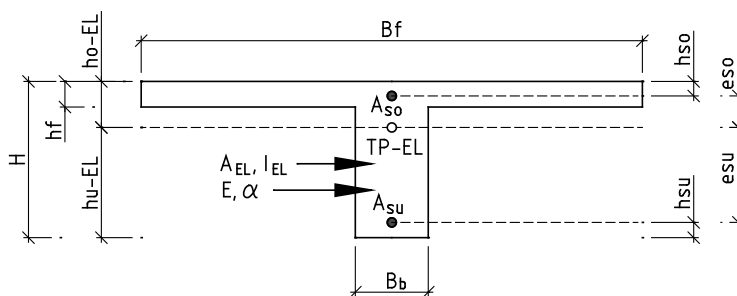
Samlet areal og tyngdepunkt for armering i overkant (o) og underkant (u) bestemmes:

- A_{so}, A_{su} = areal for armering i overkant (hele B_f) og underkant
- h_{so}, h_{su} = armeringens plassering i forhold til tyngdepunkt for elastisk tverrsnitt

Eventuell overflatearmering i bjelkens sideflater neglisjeres

Armeringens eksentrisitet, plassering i forhold til TP, bestemmes (se Figur 7 nedenfor):

- $e_{so} = h_{o-EL} - h_{so}$
- $e_{su} = h_{u-EL} - h_{su}$



Figur 7 Tverrsnittsegenskaper

2. Initiell AR-ekspansjon

Initiell AR-ekspansjon, uten motstand fra armeringen, velges (se Figur 8 nedenfor):

- ε_{ini-o} = tøyning i tverrsnittets overkant
- ε_{ini-u} = tøyning i tverrsnittets underkant

Ekspansjonen antas å være lineært varierende over tverrsnittshøyden, eventuelt uniform, og tøyninger i øvrige deler av tverrsnittet bestemmes ved lineær interpolasjon:

- ε_{ini-os} = tøyning ved overkantarmering
- ε_{ini-TP} = tøyning ved tyngdepunkt
- ε_{ini-us} = tøyning ved underkantarmering
- κ_{ini} = krumning, $(\varepsilon_{ini-o} - \varepsilon_{ini-u})/H$

3. Tøyningsreduksjon på grunn av armeringens motstand

Strekkekrefter i armeringen, gitt initiell AR-ekspansjon, bestemmes:

- $F_{so} = \varepsilon_{ini-so} E_s A_{so}$
- $F_{su} = \varepsilon_{ini-su} E_s A_{su}$

Strekkekreftene i armeringen tilsvarer aksialkraft og moment i tverrsnittet, $N_{arm} + M_{arm}$ der;

- $N_{arm} = F_{so} + F_{su}$
- $M_{arm} = F_{so} e_{so} - F_{su} e_{su}$

$N_{arm} + M_{arm}$ gir tøyninger for tverrsnittet gitt ved:

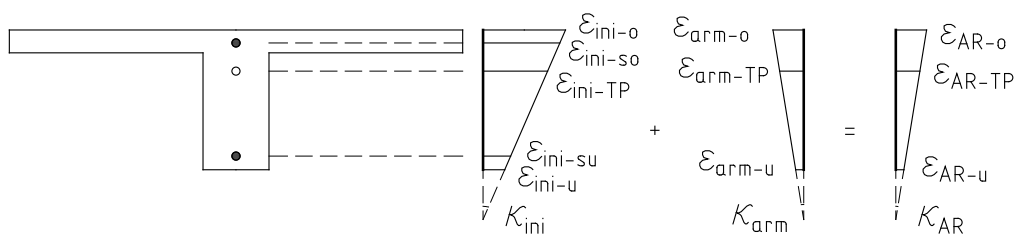
- $\varepsilon_{arm-TP} = N_{arm}/(EA_{EL})$
- $\kappa_{arm} = M_{arm}/(EI_{EL})$

4. AR-tøyninger i analysen

AR-tøyningene blir:

- $\varepsilon_{AR-TP} = \varepsilon_{ini-TP} + \varepsilon_{arm-TP}$
- $\kappa_{AR} = \kappa_{ini} + \kappa_{arm}$

Tøyningene er illustrert i Figur 8 nedenfor.



Figur 8 Tøyninger, typisk snitt ved støtte

Bæreevneklassifisering av bruer med alkalireaksjoner

FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017-2021

Prosedyren har ingen fortegneregler, så bidragenes fortegn må overvåkes. Initiell ekspansjon gir positive tøyninger ($\varepsilon_{ini} \geq 0$) og armeringens motstand mot initiell ekspansjon gir negative tøyninger ($\varepsilon_{arm} \leq 0$), som regel i hele tverrsnittet. Resulterende ekspansjon i analysen blir som regel positive tøyninger ($\varepsilon_{AR} \geq 0$) i hele tverrsnittet.

5. AR-lasten

I analysen modelleres alkalireaksjoner med følgende temperaturlaster:

- Uniform temperaturvariasjon, $\Delta T_{N-AR} = \varepsilon_{AR-TP}/\alpha$
- Vertikal temperaturgradient, $\Delta T_{M-AR} = \kappa_{AR} H/\alpha$

I noen analyseprogrammer gis temperaturgradient uten å multiplisere med H.

(b) Analysen kjøres med permanente laster og AR.

(c) Analyseresultater vurderes, for eksempel ved at forskyvninger i analysen kontrolleres mot målte forskyvninger. Dette vil typisk være forskyvning ($\varepsilon_{ini} - \varepsilon_{arm}$) L i Figur 2. Ved avvik skaleres den antatte initielle AR-ekspansjonen, og prosedyren kjøres på nytt. Denne iterasjonen gjentas til forskyvninger i analysen samsvarer med resultater fra målinger og observasjoner.

(d) Variable laster påføres i analysen, og lastene kombineres. AR-lastene (temperaturlastene) gis som regel lastfaktor 1,0 i dimensjonerende lastkombinasjoner for bruddgrensetilstand. Endelig analyse kjøres, og lastresultanter M_{Ed} og N_{Ed} for alle tverrsnitt skrives ut.

3.4.3 AR-effekter i tverrsnittskontrollene

Kontroll av momentkapasitet utføres på tverrsnitt med effektiv flensbredde.

I tillegg til tverrsnittsegenskapene fra analysen må følgende bestemmes:

- B_{f-ef} = effektiv flensbredde
- A_{so-ef} = areal for armering i overkant innenfor effektiv flensbredde
- f_{cd} = betongens dimensjonerende trykkfasthet
- f_{sd} = armeringens dimensjonerende strekkfasthet

Overflatearmering i bjelkens sideflater og armering utenfor effektiv flensbredde neglisjeres. Det er rimelig å anta at overkantarmeringens tyngdepunkt, h_{so} , er det samme som for elastisk tverrsnitt.

Momentkapasitet kontrolleres i hvert tverrsnitt/element i hele bruas lengde, enten med et dimensjoneringsprogram eller etter samme prinsipper som spennarmerte tverrsnitt, vist i Sørensen /4/, Del 2, kapittel 7.1.2, med følgende tillegg:

- Bidraget fra armeringen på trykksida inkluderes
- Aksialkraft fra tvangskrefter og ytre laster på tverrsnittet

Initiell tøyning i armering settes lik ε_{ini-os} og ε_{ini-us} .

Det er vanlig å anta en største betongtrykktøyning $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu} = -3,5 \text{ ‰}$. For negative momenter (strekk i OK) blir dette et relevant bruddkriterium for armert betongtverrsnitt i stadium III.

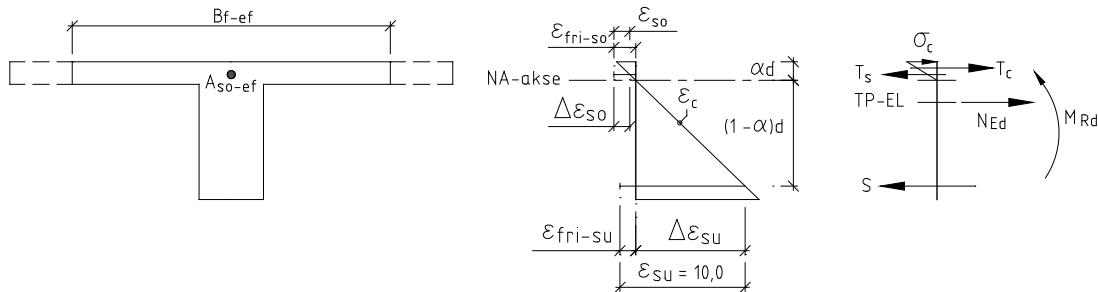
For positive momenter (strekk i UK) på T-tverrsnitt blir situasjonen ofte at trykksiden ikke er fullt utnyttet, og bruddkriteriet med $-3,5 \text{ ‰}$ er da ikke relevant. Ei grense for armeringstøyningen velges i stedet, og 10 ‰ er et vanlig valg. Dersom ikke mer nøyaktige metoder er tilgjengelige, så kan

Bæreevneklassifisering av bruer med alkalireaksjoner

FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017-2021

betongspenningene baseres på en lineær fordeling i trykksonen med kraftresultanten i 1/3-punktet for trykksonehøyden.

Kontroll av momentkapasitet for positivt moment er vist i Figur 9 nedenfor.



Figur 9 Kontroll av momentkapasitet

Tyngdepunkt-aksen (TP-aksen) tilsvarer elementaksen/systemaksen i analysen, aksialkraftas angrepspunkt. Tyngdepunkt-aksen i tverrsnittskontrollen er derfor den samme som i rammeanalysen.

OK-armeringen, trykkarmeringen, kommer ofte i nærheten av nøytralaksen (NA-aksen), noen ganger under NA-aksen, altså på strekksida, og da er det viktig å holde rede på armeringsbidragets retning i kraftlikevekten. Selv om OK-armeringen er over NA-aksen, så kan initialtøyningen være så stor at armeringen stadig er i strekk.

Tøyningen i OK-armeringen blir $\epsilon_{so} = (\epsilon_{ini-so} + \Delta\epsilon_{so})$

I Figur 9 er ϵ_{so} stadig positiv (strek).

Krefter:

- $T_c = \sigma_c / 2 \alpha d B_{f-ef}$
- $T_s = \epsilon_{so} E_s A_{so}$
- $S = f_{sd} A_{su}$

Kraftlikevekt, $T_c + N_{Ed} = T_s + S$, gir trykksonehøyden αd .

Momentkapasiteten bestemmes ved likevekt om TP-aksen, og vi får følgende bidrag:

- $M_{Tc} = T_c (h_o - \alpha d / 3)$
- $M_{Ts} = T_s (h_o - h_{so})$
- $M_S = S (d - h_o)$

I tilfellet illustrert i Figur 9 gir M_{Ts} redusert kapasitet, og $M_{Rd} = M_{Tc} + M_S - M_{Ts}$

Kapasiteten kontrolleres mot dimensjonerende moment M_{Ed} . For å sjekke at forutsetningene er oppfylt kontrolleres betongtrykktøyningen i OK til slutt mot grensa på -3,5 ‰.

I tilfellet i Figur 9 er OK-armeringen over NA-aksen, initialtøyningen er så stor at ϵ_{so} er positiv (armeringen har strekktøyning). Dersom ϵ_{so} er negativ (armeringen har trykktøyning), så vil krafta i likevektskontrollen bli motsatt rettet, og momentbidraget blir positivt.

Dersom initiell tøyning i armeringen, ε_{ini-os} og ε_{ini-us} , er beskjeden, så kan kapasiteten kontrolleres uten å ta hensyn til initiell tøyning. I mange tilfeller blir feilen liten, og de enklere forutsetningene kan gjøre det lettere å bruke dataprogrammer. Dersom kapasiteten er høyt utnyttet vil kravene til nøyaktighet være større.

3.5 Tverrsnittsegenskaper

I prosedyren for å bestemme AR-last er elastiske forutsetninger lagt til grunn:

- A_{EL} = elastisk tverrsnittsareal
- I_{EL} = elastisk arealtrehetsmoment
- Z_{TP-EL} = vertikal plassering av tverrsnittets tyngdepunkt (h_{o-EL} og h_{u-EL} i prosedyren)
- E = E-modul som benyttes i den elastiske analysen

For alkalireaksjoner er dermed forutsetningene ved bestemmelse av lasten og ved analyse av lastvirkninger like. Bruas tverrsnitt kan modelleres med predefinerte tverrsnitt, typisk: T-tverrsnitt, der A , I og Z_{TP-EL} bestemmes automatisk, og E-modulen er lik i alle deler av analysemodellen.

En mer nøyaktig metodikk vil være å bruke tverrsnittsegenskaper og materialegenskaper for armert betong. Ved bestemmelse av AR-lasten regnes da med EA , EI og Z_{TP} for armert betongtverrsnitt. I analysen modelleres bruas tverrsnitt med generelle tverrsnittsegenskaper, A , I og Z_{TP} , og E-modul tilpasset egenskapene benyttet for AR-lasten. Hver variant av armeringsmengder i OK og UK må da modelleres som egne tverrsnitt.

Med tverrsnittsegenskaper for armert betong kan både urisett tverrsnitt (stadium I) og risset tverrsnitt (stadium II) antas. De samme forutsetningene må uansett benyttes både ved bestemmelse av AR-lasten og i analysen. Modellering av risset tverrsnitt må baseres på en antagelse om momentets retning, altså om tverrsnittet er risset fra underkant (typisk: i felt) eller fra overkant (typisk: områder inn mot opplegg), for egenvekt eller permanente laster.

Et risset tverrsnitt har mindre effektivt areal og arealtrehetsmoment enn et urisett tverrsnitt. Lastvirkningene som representerer armeringens motstand, N_{arm} og M_{arm} , vil bli mindre, og de endelige AR-lastene i analysen, ΔT_{N-AR} og ΔT_{M-AR} , vil bli større. På den annen side så vil stivhetene i analysemodellen bli mindre, og dermed blir lastvirkningene mindre. Det er derfor ikke åpenbart hvilke forutsetninger som gir størst utslag for alkalireaksjoner.

Slakkarmerte betongbruer er ofte dimensjonert slik at de er risset i bruksgrensetilstand, og det vil i beregningene kunne være rimelig å anta at bruoverbygningen har fått riss før alkalireaksjonene begynner å virke. Selv om større eller mindre deler av en brubjelke har riss for permanente laster, er det ikke gitt at tverrsnittene tilfredsstiller de teoretiske forutsetningene til stadium II, med null strekkspenninger i betongen i hele strekksonen. I virkeligheten er overgangen mellom stadium I og II glidende. I virkeligheten vil en «midlere tilstand» for en brubjelke med permanente laster som regel være et sted mellom stadium I og II. Med de betydelige AR-virkningene vi regner med, vil dessuten et tverrsnitt i stadium II for permanente laster etter hvert gå mot stadium I, fordi riss lukkes etter hvert som AR-tøyningene utvikles. Det er uansett rimelig å anta at tverrsnittenes tilstand (risset eller ikke) er ganske lik i hele brulengden. Derfor er det også rimelig å bruke de samme forutsetningene i hele lengden.

Elastiske egenskaper, urisett eller risset armert betongtverrsnitt kan gi ulik *fordeling* av momenter fra alkalireaksjoner, men det er ikke åpenbart hvilke forutsetninger som gir *størst* lastvirkninger. Det vil uansett være naturlig å innlede med elastiske forutsetninger, fordi det er enklest, før mer nøyaktige tverrsnittsegenskaper eventuelt modelleres.

Modellering og analyse av alkalireaksjoner er ellers grundig forklart i /5/, utarbeidet av Kathrine Stemland i forbindelse med hennes PhD-avhandling.

4 Andre beregningsmessige konsekvenser av alkalireaksjoner

4.1 Innledning

Fokus i kapittel 2 og 3 i denne rapporten er på bøyning og momentkapasitet for en bruoverbygning som kan analyseres som en bjelke. Dette er en viktig aktivitet, og AR kan inkluderes i beregningene etter en relativt enkel beregningsmetodikk. AR kan imidlertid opptre nærmest hvor som helst og kan påvirke konstruksjoner på mange måter. I dette kapitlet er noen problemstillinger belyst mer overordnet.

4.2 Vegger

Konstruksjonsdeler med stor utstrekning og liten fastholding (store og jevne overflater) med betong utsatt for AR får som regel et karakteristisk krakeleringsmønster. Dette er vanlig for eksempel på støttemurer, se Figur 10 nedenfor.



Figur 10 Landkarvinge med riss som skyldes AR
(Foto: Audun E. Sanda, Statens vegvesen)

I noen tilfeller kan AR-riss og -skader i støttemurer og kulvertvegger påvirke bæreevnen, men ofte er problemet i større grad knyttet til bestandighet, særlig ved samtidig kloridinntrenging.

4.3 Søyler og tårn

Søyler og tårn har som regel store vertikale betongtrykkspenninger, og vertikal ekspansjon på grunn av AR vil være forhindret. AR i sirkulære søyler medfører som regel at betongen ekspanderer radielt, og dette gir strekktøyninger i ringretningen og vertikale riss, se for eksempel Figur 11 nedenfor. Dersom slike søyler forsterkes med karbonfiber som trekkes rundt søyla, så vil betongen få triaksial trykkspenningstilstand og økt kapasitet.



Figur 11 Søyle på Elgeseter bru med vertikalt riss på grunn av alkalireaksjoner (Foto: Eva Rodum, Statens vegvesen)

AR i rektangulære søyler eller tårnbein, se for eksempel Figur 12 nedenfor, vil også kunne medføre horisontal ekspansjon, horisontale strekkføringer og vertikale riss. For plane/kantete tverrsnitt er karbonfiberomvikling mindre egnet, og andre tiltak kan være nødvendig for å sikre kapasiteten.



Figur 12 Hengebrutårn med vertikale riss på grunn av alkalireaksjoner (Foto: Eva Rodum, Statens vegvesen)

4.4 Komplekse bæresystemer eller brutversnitt

På samme måte som en enkel bruoverbygning kan også mer komplekse brutyper og konstruksjonsdeler analyseres med rammemodeller. Dette kan gjelde for eksempel buebruer med relativt smal overbygning. Det kan også gjelde tårn for skråstagbruer og hengebruer. Bjelkeelementer er uansett brukbare der en konstruksjonsdel virker som en bjelke. For bredere eller mer massive konstruksjonsdeler kan FEM-analyser med skallelementer eller volumelementer være nødvendig. Prinsippene beskrevet i denne veiledningen vil være de samme, men modelleringen kan være mer krevende. Brede bruer med flere langsgående bjelker og horisontalt

Bæreevneklassifisering av bruer med alkalireaksjoner

FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017-2021

varierende ekspansjon, for eksempel Elgeseter bru, se Figur 13, krever som regel bjelkeristmodeller eller FEM-modeller.



Figur 13 Elgeseter bru – betongplate med fire langsgående underliggende bjelker (Foto: Eva Rodum, Statens vegvesen)

4.5 Konsekvenser av at bruas bæresystem endres på grunn av AR

I kapittel 2.2 ble det skilt mellom direkte konsekvenser av betongens AR-ekspansjon og konsekvenser av at bæresystemets opplagerbetingelser (og dermed analysemodellens grensebetingelser) endres på grunn av ekspansjonen. Typiske eksempler ble nevnt, at en fuge lukkes eller et glidelager skyves ut av stilling. Lager skjøvet ut av stilling er illustrert i Figur 14 nedenfor.



Figur 14 Lager på Fiborg bru skjøvet ut av stilling på grunn av alkalireaksjoner i bruplata (Foto: Eva Rodum, Statens vegvesen)

Analysemodellene, som regel grensebetingelsene, kan måtte gjøres om, og dette kan i noen tilfeller, særlig i områdene rundt de endrede betingelsene, påvirke lastvirkningene betydelig.

4.6 Delaminering av dekker

Platebruer med mye AR kan få delaminering av store områder av dekket, se Figur 15. Dette kan påvirke momentkapasiteten, men en enda større utfordring kan være skjærkapasiteten.



Figur 15 Deler av demontert brudekke med horisontal delaminering på grunn av alkalireaksjoner (Ref: Arne Henriksen, Vejdirektoratet/DK)

5 Litteratur

Vegnormaler og veiledninger

Statens vegvesen (2021) veiledning V412 *Bæreevneklassifisering av bruere, laster*.

[vegvesen.no > fag > håndbøker > håndbøker, fullstendig liste](#)

Statens vegvesen (2021) veiledning V413 *Bæreevneklassifisering av bruere, materialer*.

[vegvesen.no > fag > håndbøker > håndbøker, fullstendig liste](#)

Statens vegvesen (2022) vegnormal N400 *Bruprosjektering*.

[vegvesen.no > fag > håndbøker > vegnormalene](#)

Annen litteratur

1. Stemland, H., Rodum, E. og Johansen, H. (2016): *Alkalireaksjoner – Veiledning for konstruktiv analyse. Etatsprogrammet Varige konstruksjoner 2012-2015*. Statens vegvesen rapport nr. 601.

[vegvesen.no > fag > publikasjoner > publikasjoner fra Statens vegvesen > Statens vegvesens rapportserie](#)

2. Rodum, E. og Pedersen, B. M. (2023): *Inspeksjon av bruere med alkalireaksjoner. Felt- og laboratorieundersøkelser. FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017-2021*. Statens vegvesen rapport nr. 852.

[vegvesen.no > fag > publikasjoner > publikasjoner fra Statens vegvesen > Statens vegvesens rapportserie](#)

3. Kongshaug, S. S., (2023): *Load effects of alkali-silica reaction in reinforced concrete beam bridges - Material testing, Constitutive modelling and Numerical simulation*. PhD thesis, Department of Structural Engineering, NTNU, and Department of Civil Engineering and Energy Technology, OsloMet.

4. Sørensen, S. I. (2013): *Betongkonstruksjoner – Beregning og dimensjonering etter Eurocode 2*, 2. utgave, 2013. Akademika forlag, Trondheim.

5. Stemland, K. M., Johansen, H. og Kanstad, T. (2023): *Load effects of ASR-induced expansion in reinforced concrete and their consequences for structural assessment*. Innsendt til publisering i Nordic Concrete Research Journal.



Statens vegvesen
Pb. 1010 Nordre Ål
2605 Lillehammer

Tlf: (+47) 22 07 30 00

firmapost@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Tryggere, enklere og grønnere reisehverdag