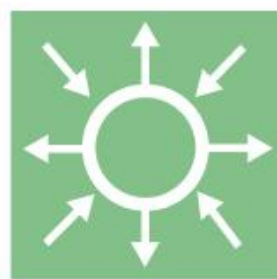
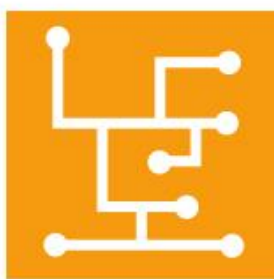




Tillståndsbedömning av för- ankringsstag i dammar

Inventering av möjliga metoder och förslag
på vidareutveckling



Elforsk rapport 13:70

Tomas Ekström
Manouchehr Hassanzadeh
Mårten Janz
Bror Sederholm
Bojan Stojanovic
Peter Ulriksen

December 2013

ELFORSK

Tillståndsbedömning av för- ankringsstag i dammar

Inventering av möjliga metoder och förslag
på vidareutveckling

Elforsk rapport 13:70

Tomas Ekström
Manouchehr Hassanzadeh
Mårten Janz
Bror Sederholm
Bojan Stojanovic
Peter Ulriksen

December 2013

Förord

Många stora konstruktioner inom vattenkraftindustrin består av betong. Att utveckla och effektivisera förvaltning av dessa är av största betydelse. Vattenkraftföretagen*) har via Elforsk bedrivit forskning och utveckling inom det betongtekniska området sedan början av 90-talet.

Verksamheten syftar till att utveckla förvaltningen av vattenkraftens betongkonstruktioner för att minska produktionsbortfall och för att uppfylla dammsäkerhetstekniska krav på betongkonstruktionerna.

Detta projekt handlar om ej förspända (slakarmerade) förankringsstag som finns i många betongdammar som en extra säkerhet mot glidning och stjälpning. På grund av att de inte är åtkomliga och därmed svåra att statusbestämma ingår de enligt RIDAS normalt inte i stabilitetsberäkningar för dammar.

Det finns exempel som visar på att förankringsstag kan ha ett mycket gott tillstånd efter ca 40 år och projektet har föranletts av att det finns ett intresse för att på ett kvalificerat sätt kunna bedöma befintliga förankringsstags bidrag till stabiliteten. Det hänger ihop med förankringsstagens status och projektet gör en genomgång av vilka metoder som finns eller skulle kunna utvecklas för att mäta eller bedöma statusen i befintliga förankringsstag och i nya installationer.

En slutsats är att det inte är möjligt att, på ett direkt och entydigt sätt, bedöma ett ej åtkomligt redan installerat förankringsstags tillstånd och bärförmåga. Däremot anses vägar framåt finnas med avseende på att utveckla analysmetoder för att indirekt kunna bedöma även sådana stags status och bidrag till en dams stabilitet. För att göra detta föreslås bland annat att man börjar med systematisk insamling av erfarenheter vad gäller bärförmåga, brottmoder och nedbrytningsmekanismer i verkliga installationer.

Stockholm mars 2014



Cristian Andersson

Elforsk

*)Vattenfall Vattenkraft AB, Fortum Generation AB, E.ON Vattenkraft Sverige AB, Statkraft Sverige AB, Skellefteå Kraft AB, Jämtkraft AB, Sollefteåforsens AB, Karlstads Energi AB, Jönköping Energi AB deltar i Betongtekniskt program vattenkraft 2010-2012.

Sammanfattning

Det finns återkommande frågor kring huruvida det är möjligt att mäta eller bedöma tillstånd och livslängd hos befintliga förankringsstag, som ej är efter-spända, i betongdammar. Denna rapport sammanfattar genomförda arbeten och inventerar möjliga tillståndsbedömningsmetoder.

Bortsett från vissa undantagsfall, visar denna rapport att det inte är möjligt att, på ett direkt och entydigt sätt, bedöma ett redan installerat förankringsstags tillstånd och bärförmåga. Undantagsfallen är:

- Om dragstaget är åtkomligt kan man belasta och avgöra dess bärförmåga. Detta är naturligtvis en form av förstörande provning. Man kan även belasta staget till en förutbestämd nivå. Om staget klarar belastningen, utan större kvarvarande deformationer, efter att det har avlastats, kan man likställa lasten med stagets bärförmåga.
- Om dragstaget är åtkomligt och dess längd är känd kan man vi mätmetoder avgöra om det är avbrutet eller ej. Man kan även avgöra om det finns större defekter som hållrum, korrosion, dålig vidhäftning mellan stag och bruk / bruk och berg. Den här typen av defekt kan upptäckas om processen har hunnit långt.

Arbetet visar dock, att det finns olika möjligheter att kunna följa ett nyinstallerat stags egenskaper, om detta förses med rätt utrustning. Arbetet visar att den kunskap som på detta sätt kan erhållas, även kan användas för tillståndsbedömning av befintliga stag och utveckling av bättre analysmodeller.

Vidare, visar arbetet att det för utveckling av bättre analysmodeller är nödvändigt att kombinera avancerade beräkningsmodeller med olika provningar och mätningar, både i laboratorie och i fält. Beräkningar kan användas för bestämning av typ av mätningar, placering och antalet mätpunkter, m.m. Beräkningar kan även användas för att avgöra olika parametrars inflytande på mätresultaten.

Om dragstag ska kunna medräknas i stabilitetsberäkningar, bör man starta med systematisk insamling av erfarenheter vad gäller bärförmåga, brottmoder och nedbrytningsmekanismer i verkliga installationer. Det kräver att de tillfällen som ges att samla på sig praktisk erfarenhet tas tillvara. Arbetet bör inkludera provning av ingjutna stag (när dessa ev. friläggs) och instrumentering av nya stag samt eventuellt provning. Arbetet bör föregås av en noggrann planering och presentation av de parametrar som bör bestämmas.

Ett viktigt verktyg för planering av provningar, val av parametrar samt ökad förståelse, är modellering av staget och dess samverkan med den omgivande miljön. Modellerna skall minst beskriva systemets deformationer, uppsprickning och eventuella brottmod. Vidare, skall modellerna på ett förenklat sätt kunna beskriva de nedbrytningsprocesser som påverkar systemet.

Summary

There are questions whether it is possible to measure or assess the condition and service life of existing anchor rods, which are not post-tensioned, in concrete dams. This report presents adjacent and adjoining work in the field and possible measuring methods.

It is obvious that measurements are complicated in existing dam structures, due to lack of access, as anchor rods are predominately embedded in the structure. Apart from exceptional cases, this report shows that it is not possible to directly and unambiguously assess the condition and load capacity, of an already installed anchor rod. The exceptions are:

- If the anchor rod is accessible, its load capacity can be assessed by applying a given stress. If the rod displays no or minor deformation after distressing, the applied stress can be equalled to its load bearing capacity. Noted is that this method of testing is destructive.
- If the anchor rod is accessible and its specific length is known, it is possible to determine major defects through measurement techniques. These defects can be listed as: anchor rod fracture, progressed anchor rod corrosion, adhesion loss between rod/grout/rock, grout cavities.

However, the work shows that there are various possibilities to monitor newly installed anchor rods – if they are fitted with the right equipment. The work also shows that the obtained data, hence knowledge, from such installations could be useful for assessment of the condition of anchor rods in existing dam structures and for improving analysis methods.

Furthermore, the work shows that development of improved analysis methods need to combine advanced calculation methods with tests and measurements, both in the laboratory and in the field. Calculations can be used for determining suitable types of measurements, placements and number of measuring positions, etc. Calculations can also be used to determine the influence of various material and geometrical parameters, and their impact on measurement results.

If anchor rods are to be included in dam stability calculations, a long-term field experience and data collection campaign should be started. In the current situation, there is a lack of experience, field data and statistics, with regard to load capacity, failure modes and degradation mechanisms. A joint initiative is encouraged where every opportunity given should be captured to gather experiences. It should include testing of existing anchor rods (when they become available) and instrumentation of newly installed anchor rods, as well as testing. The work should be preceded by careful planning and presentation of properties aimed for determination.

An important tool for test planning, choice of parameters/properties and increased understanding, is modelling of anchors rods and there interaction with the surrounding environment. The models should, at least, describe the system deformation, cracking and failure modes. Furthermore, these models should be able to describe the degradation processes affecting the anchors.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte och mål	1
1.3	Projektets genomförande	1
1.4	Avgränsning	2
1.5	Angränsande projekt	2
1.5.1	Grouted Post-Tensioned Rock Anchor Assessment.....	2
1.5.2	Non-Destructive Testing of Bar or Cable Anchors Embedded in Concrete Dams.....	2
1.5.3	Korrosionsskydd av bergbultar	3
1.5.4	Utveckling av tekniska råd för funktionskrav vid underjordsanläggningar med avseende på den kemiska miljön.	3
1.5.5	Kraftverkstunnlars beständighet – En studie om åldringsfenomen och nedbrytningsprocesser	3
2	Bergförankring och dess inverkan på stabilitet	4
2.1	Bergförankring.....	4
2.2	Bergförankringens brottförlopp och funktionskrav	6
2.2.1	Allmänt	6
2.2.2	Brott i berg	8
2.2.3	Samverkan berg - bruk	8
2.2.4	Samverkan bruk – stål	8
2.2.5	Kapacitet i stålet.....	9
2.2.1	Samverkan betong – stål.....	9
2.3	Befintlig tillståndskontroll och uppföljning	9
3	Tillståndsbedömning av bergförankring	10
3.1	Allmänt om inverkan faktorer.....	10
3.1.1	Allmänt	10
3.1.2	Bergets mekaniska egenskaper	11
3.1.3	Bergets fysikaliska egenskaper	11
3.1.4	Brukets fysikaliska och mekaniska egenskaper	12
3.1.5	Stålets mekaniska egenskaper	12
3.2	Boltometer	13
3.3	Bedömning av stagstålets status med ultraljud	15
3.4	Bedömning av förankringens status med hjälp av dammkrönets förskjutning.....	17
3.5	Bedömning av stålets status med hjälp av röntgen.....	20
3.6	Bedömning av bergets status via borrhning.....	20
3.7	Bedömning av bergets status med hjälp av seismik	21
3.8	Bedömning av brukets status med ultraljud	24
4	Förberedelse för övervakning av bergförankringar vid nyproduktion	27
4.1	Bedömning av stålets status med hjälp av sond	27
4.2	Bedömning av stålets status med hjälp av resistans mätning.....	29
4.3	Bedömning av stålets status med hjälp av koaxialkabel	30
4.4	Bedömning av stålets status med hjälp av ultraljud	33
5	Teoretiska metoder för tillstånds- och livslängdsbedömning	35
5.1	Allmänt.....	35
5.2	Bergets fysikaliska egenskaper	35
5.2.1	Allmänt	35

5.2.2	Bergets täthet mot vattentransport.....	35
5.2.3	Flöde av aggressiva ämnen.....	36
5.2.4	Urlakning av bruk eller betong runt förankringen	36
5.2.5	Aggressiva joner.....	37
5.2.6	Syretransport.....	37
5.2.7	Slutsats.....	38
5.3	Bergets mekaniska egenskaper.....	38
5.4	Brukets fysikaliska och mekaniska egenskaper	40
5.5	Stålets mekaniska egenskaper.....	40
5.6	Betongens fysikaliska och mekaniska egenskaper	41
5.7	Betongdammens totala bärförmåga.....	41
6	Brottmoder och deformation	42
6.1	Slutsats	46
7	Diskussion	47
8	Slutsatser	49
9	Förslag till fortsatt arbete	50
10	Referenser	51

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Slakarmerade förankringsstag och bergbultar är två olika komponenter. Dessa har dock flera gemensamma nämnare vad gäller ev. nedbrytning över tid. Rent principiellt skall de statusbedömas på samma sätt, men förutsättningarna för åtkomlighet skiljer sig markant. Resultatet från Hotagen projektet [1] visar att förankringsstagen håller hög standard efter ca 40 år. Teoriberäkningarna visade även att stagen fyller stor funktion för en betongdamms stabilitet. Genomförd provning och besiktning visade i detta fall att man skulle kunna använda förankringsstagen i stabilitetsberäkningarna och erhålla en, av RIDAS, rekommenderad och godkänd stabilitet mot stjälpning hos Hotagens regleringsdamm.

Vattenkraften efterlyser en metodik för att kunna bedöma stagens status med avseende på tillstånd och livslängd.

Följande punkter har identifierats som försämrade omständigheter gällande slakarmerade bergförankringar:

- Korrosion av järnet
- Försämrade vidhäftning mellan stag → injekteringsbruket → berg
- Nedbrytning av injekteringsbruk
- Nedbrytning av berg ex. sprickbildning

Enligt Elforskrapporten, Hotagen 09:73 [1], är dagens kunskap bristfällig för att kunna bedöma stagens befintliga status och egenskaper.

En ändamålsenlig och tillförlitlig metodik måste inkorporera ovanstående punkter.

1.2 Syfte och mål

Föreslå en metodik och identifiera utvecklingsbehov för att kunna bedöma tillstånd och livslängd för förankringsstag i betongdammar som underlag för stabilitetsberäkningar.

1.3 Projektets genomförande

Detta projekt är sammansatt av problematik som spänner över flera kompetensområden bl.a. geoteknik, betongteknik, mätteknik och konstruktionsteknik etc.

Inom ramen för projektet har en arbetsgrupp tillsatts med bred expertis. Nedan presenteras arbetsgruppen samt tillhörighet och expertis:

- ÅF – Konstruktionsteknik – Vattenkraft, Beräkningar och Modellering
 - Tomas Ekström och Mårten Janz

- Lunds Tekniska Högskola (LTH) – Oförstörande provning och mätteknik
 - Peter Ulriksen
- SWEREA/KIMAB – Korrosion och armeringskorrosion, mätteknik
 - Bror Sederholm
- Vattenfall Research and Development AB (VRD) – Betong och konstruktioner inom kraftindustrin
 - Manouchehr Hassanzadeh och Bojan Stojanovic

1.4 Avgränsning

Projektet fokuserar på förankringsstag som ej är efterspända, vars funktion är att förankra dammkonstruktioner, se

Figur 2-1, Figur 2-2, Figur 2-3, Figur 2-4.

1.5 Angränsande projekt

1.5.1 Grouted Post-Tensioned Rock Anchor Assessment

Projektet är pågående och arbetet finansieras av CEATI International, Inc. - Dam Safety Interest Group (DSIG) [2].

Syftet med projektet är att tillföra kunskap, gällande beständighet och tillförlitlighet, på området cementinjekterade spännkablar, vars applikation är förankring av dammkonstruktioner. Arbetet baseras på att utföra och erhålla prover från dammkonstruktioner som har rivits. Avsikten är att erhålla fältdata från konstruktioner som varit i bruk. Målet är framförallt att undersöka uppkomsten och fortskridningen av korrosion, samt utveckla metodik för provning och kvantifiering av dominerande korrosionsfaktorer. Utöver åldringsprocessen och dess åverkan, är målet att identifiera möjliga praktiska metoder för övervakning och mätning av spännkablers funktion i denna specifika applikation.

1.5.2 Non-Destructive Testing of Bar or Cable Anchors Embedded in Concrete Dams

Projektet är avrapporterat och arbetet har finansierats av CEATI International, Inc. - Dam Safety Interest Group (DSIG) [3].

Inom ramen för projektet har flertalet delstudier utförts. Studierna har fokuserats på utvärdering av Time Domain Reflectometer (TDR)- och Spectral Time Domain Reflectometry (STDR)-metod för att detektera och mäta skador på ingjutna spännkablar. Arbetet har baserats på simulering och mätningar i laboratoriet samt fält.

Förslag och exempel på TDR-metod för mätning av spännstag presenteras i denna rapport i avsnitt 4.3.

1.5.3 Korrosionsskydd av bergbultar

Projektet är avrapporterat och projektet har finansierats av Trafikverket, Elforsk, BeFo, Nordic Galvanizers AB, Outokumpu Stainless AB, Galvano A/S Vik Ørsta och SBUF [4]. Syftet med projektet har varit att ta fram krav på korrosionsskydd av bergbult och andra produkter utsatta för sprickvatten från berg med hög kloridhalt samt att ge ett tekniskt och ekonomiskt underlag för val av material och beläggningar. Arbetet har baserats på fältexponeringar av bergbultar av olika metalliska material och skyddsbeläggningar i Muskötunneln och i Äspötunneln.

1.5.4 Utveckling av tekniska råd för funktionskrav vid underjordsanläggningar med avseende på den kemiska miljön.

Projektet som nyligen påbörjats (2013) är ett samarbetsprojekt mellan Sweerea KIMAB, Chalmers och CBI Betonginstitutet. Projektet finansieras i huvudsak av Formas, SBUF, Elforsk och Cementa. Det övergripande målet för projektet är att ytterligare utveckla standarder för att uppfylla funktionella krav på underjordiska anläggningar med avseende på den kemiska miljön i form av grundvattensammansättning och undermarksanläggningars atmosfär.

1.5.5 Kraftverkstunnlars beständighet – En studie om åldringsfenomen och nedbrytningsprocesser

Detta examensarbete [5] undersöker åldringsfenomen och nedbrytningsprocesser av kraftverkstunnlar i berg, specifikt tunnelförstärkning med fokus på korrosion av bergbultar. Arbetet visar att inget specifikt tunnelras kan härledas till enbart korrosion. Dominerade faktorer är bergets beskaffenhet, inklusive variation i hydrostatiskt tryck under drift. Korrekt installerade bergbultar uppvisar god beständighet med lågt korrosionsangrepp i denna miljö. Dock skall detta beaktas under senare period av tunnels livscykel, framför allt med avseende på dess avsedda livslängd ~100 år.

2 Bergförankring och dess inverkan på stabilitet

2.1 Bergförankring

Vid kontroll av stabiliteten hos en betongdamm analyseras vanligtvis:

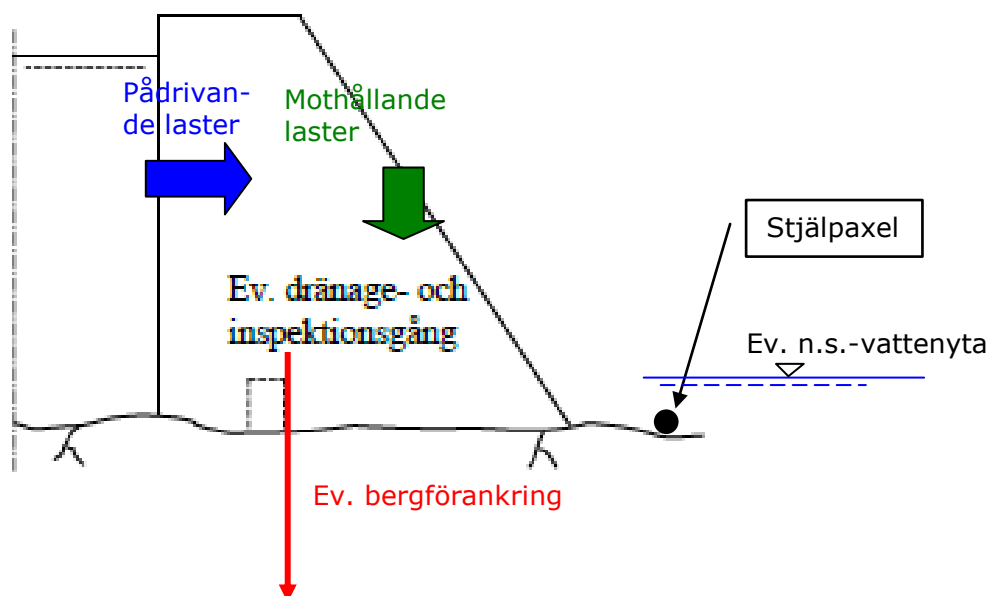
Stjälpning: $S = M_{\text{mot}}/M_{\text{på}} \geq \text{villkor, t.ex. 1.5}$ (2-1)

Glidning: $\mu = R_H/R_V \leq \text{villkor, t.ex. 0.75}$ (2-2)

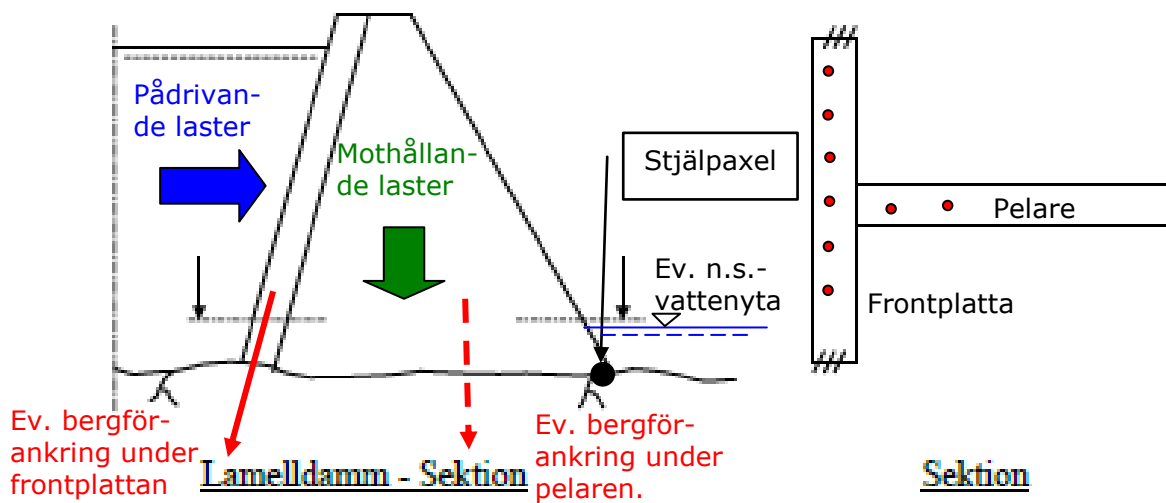
Risk för uppsprickning i u.s.-kanten: R_V innanför kärngränsen (2-3)

Där S = stjälpssäkerhet (Nm/Nm); M_{mot} = mothållande moment (Nm); $M_{\text{på}}$ = pådrivande moment (Nm); μ = glidsäkerhet (N/N); R_H = horisontell lastresultant (N); R_V = vertikal lastresultant (N); och kärngränsen = ytan vari lastresultanten R_V ska hålla sig innanför för att inga dragspänningar ska uppstå. Villkoret ovan beror på typ av grundläggning (berg, morän, sand) och lastfall (vanligt/exc.).

Villkoren som kontrolleras ovan utförs oftast på en förenklad statisk modell. För stjälpning och glidning används en stelkroppsmodell och för risk för dragspänningar och uppsprickning används en balkmodell. I verkligheten är dammar i högsta grad deformerbare kroppar och av sådan vidd att de bättre beskrivs som solida kroppar i plant töjning eller plant spänningstillstånd (skivor) än som balkar. Se exempel för en klumpdamm i Figur 2-1 och för en lamelldamm i Figur 2-2.



Figur 2-1 Principiell figur av en massiv damm [6].



Figur 2-2 Principiell figur av en lamelldamm [6].

Kraftupptagande förmåga hos bergförankringar/bergstag används för att:

- Förbättra stjälpssäkerheten genom att öka M_{mot} med sitt momenttillskott $M_{\text{stag}} = R_{\text{stag}} \cdot L_{\text{stag}}$.
- Förbättra glidsäkerheten genom att öka R_v med sitt tillskott R_{stag} .
- Om staget är slakt förbättras enbart brottsäkerheten.
- Om staget är efterspänt ökas även brukssäkerheten, t.ex. genom att risken för att betongen spricker minskar p.g.a. en pålagd, tryckande normalkraft.

Där M_{stag} = momenttillskott av bergförankringen (Nm); R_{stag} = bärförmågan hos bergförankringen (N); och L_{stag} = hävarmen från stjälpaxeln till resp. förankring (m).

Bergförankringars inverkan på stabiliteten beror huvudsakligen på:

- Storleken på R_{stag} (beräknas)
- Hävarmen L_{stag} till en tänkt rotationsaxel A. (mäts eller tas från ritningar)
- Hur många stag det finns. (mäts eller tas från ritningar)

Storleken på R_{stag} behandlas vidare nedan.

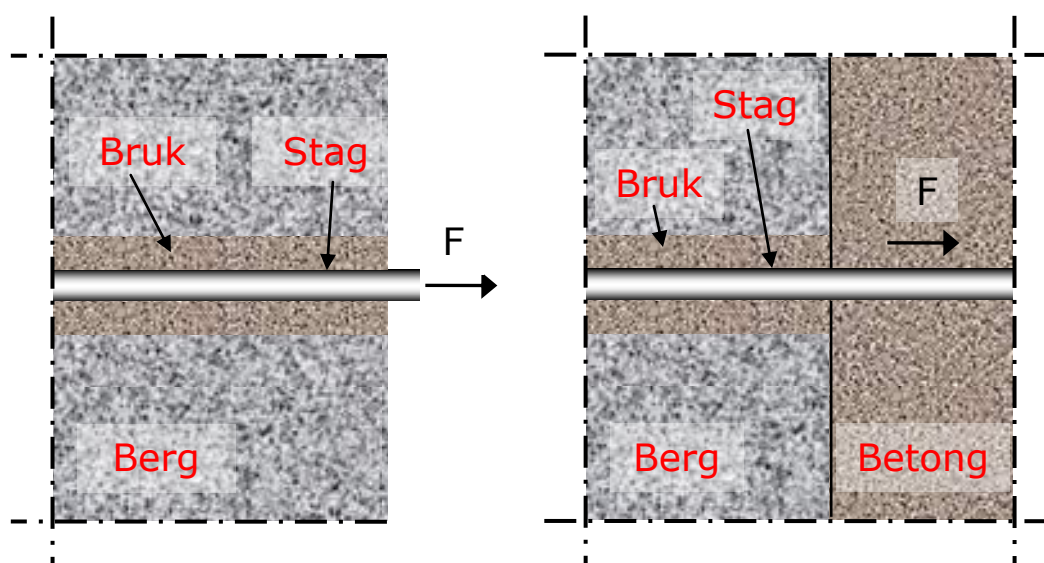
2.2 Bergförankringens brottförlopp och funktionskrav

2.2.1 Allmänt

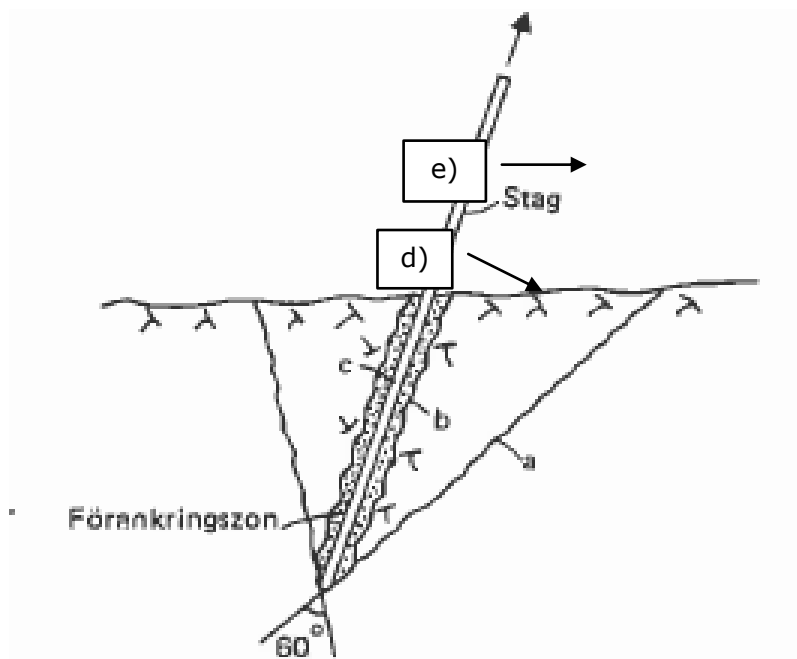
En bergförankrings (Figur 2-3, Figur 2-4, Figur 2-5) bärförmåga R_{stag} kan sägas vara det minsta av följande värden:

$$R_{stag} = \min(R_{berg}, R_{bruk-berg}, R_{stål-bruk}, R_{stål}, R_{btg-stål}) \quad (2-4)$$

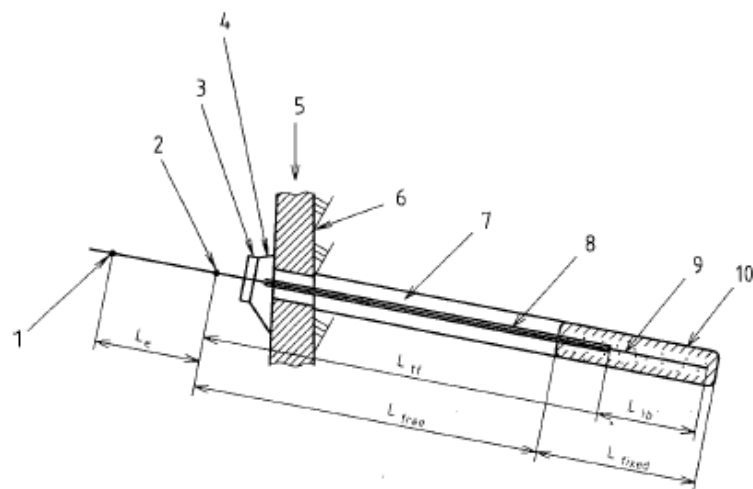
Där R_{berg} = kraft från samverkande berg; $R_{bruk-berg}$ = samverkan bruk-berg; $R_{stål-bruk}$ = samverkan stål-bruk och $R_{stål}$ = kapaciteten hos stålet i bergstaget.



Figur 2-3 Principiell figur som visar uppbyggnad av bergförankringsstag. T.v. stag ingjutet i berg. T.h. stag var funktion är att förankra godtycklig betong komponent/konstruktion. Not, ej efterspänd förankring.



Figur 2-4 Principiell bild av en bergförankrings kraftupptagning [7]. a) = brott i bergmassan; b) = brott mellan berg och bruk; c) = brott mellan bruk och stål; och d) = brott i stålet; och e) = brott betong-stål.



Key

- | | | | |
|---|---|----|------------------|
| 1 | Anchorage point at jack during stressing | 6 | Soil/rock |
| 2 | Anchorage point at anchor head in service | 7 | Borehole |
| 3 | Bearing plate | 8 | Debonding sleeve |
| 4 | Load transfer block | 9 | Tendon |
| 5 | Structural element | 10 | Grout body |

Figur 2-5 Principfigur av en bergförankring [8].

2.2.2 Brott i berg

Brott i berg brukar antas efter antagande om tyngden hos en viss bergvolym som dras loss av bergförankringen samt ibland även från en mothållande friktionskraft och ev. kohesionskraft på bergvolymens ytor [7].

$$R_{\text{berg}} = \text{Tyngd bergkon} + \text{ev. vidhäftning kon-övrigt berg} = V_{\text{kon}} \cdot \gamma_{\text{berg}} + A_{\text{kon}} \cdot \tau_{\text{kon}} \quad (2-5)$$

Antingen brukar man räkna med både tyngden av den tänkta konen och mothållande skjuvkraft mellan konen och omgivande berg, eller enbart tyngden av konen. Svårigheten är framförallt att uppskatta sprickigheten i berget, hållfastheten och hur en tänkt bergvolym kan tänkas följa med i förankringens rörelse.

2.2.3 Samverkan berg - bruk

$$R_{\text{bruk-berg}} = A \cdot \tau = \pi \cdot d \cdot L_{\text{förankr}} \cdot \tau_{\text{cd}} \quad (2-6)$$

där $R_{\text{bruk-berg}}$ = bärförmåga hos fogen mellan bruk och berg; A = mantelarean hos fogen mellan bruket och berget (m^2); d = borrhålsdiameter (m); $L_{\text{förankr}}$ = förankringslängd; och τ_{cd} = vidhäftningshållfastheten mellan bruk och berg.

Förankringslängden kan vara hela eller en del av det borrarade hålets längd, (se Figur 2-5 och punkt 9) "Tendon" betecknar själva förankringslängden, d.v.s. den längd som förankringsstålet omges av förankrande bruk mot berget.

τ_{cd} = vidhäftningshållfastheten beror på brukets och bergets egenskaper. Vid vittrat och sprucket berg sjunker τ_{cd} . Vid dåligt bruk, t.ex. p.g.a. frost- eller urlakningsskador sjunker τ_{cd} . Oftast antas en konstant skjuvspänning τ , men i verkligheten varierar den längs förankringen beroende på förhållandet mellan bergets och brukets E-moduler.

Val av borrhålsdiameter beror bl.a. på förankringstyp och storlek och borrhörningsmetod. T.ex. får man en mer glatt yta om man kärnborrar och då minskar vidhäftningshållfastheten, om man inte ruggar upp ytan efteråt.

2.2.4 Samverkan bruk – stål

$$R_{\text{stål-bruk}} = A \cdot \tau = \pi \cdot \phi \cdot L_{\text{förankr}} \cdot \tau_{\text{cd}} \quad (2-7)$$

där $R_{\text{bruk-berg}}$ = bärförmåga hos fogen mellan bruk och stål; A = mantelarean hos stålet (m^2); ϕ = förankringens diameter (m); $L_{\text{förankr}}$ = förankringslängd, se avsnitt 2.2.3; och τ_{cd} = vidhäftningshållfastheten.

Vid spännkablar är det förankringsstålets, -linornas totala area mot bruket som räknas.

Vid korrosion hos förankringen minskar diametern hos stålet men i ekvationen ovan är det ursprungsdiametern som menas. Försvagningen p.g.a. korrosionen kommer snarare in i vidhäftningshållfastheten τ_{cd} som minskar.

Vid räfflade förankringsstål ökar vidhäftningen mellan bruket och stålet, jämför [9] ekvation (3.9.1.2a).

2.2.5 Kapacitet i stålet

$$R_{\text{stål}} = f_{yd} \cdot A_{s,t} = f_{yd} \cdot \pi \cdot \phi t / 4 \quad (2-8)$$

där $R_{\text{stål}}$ = bärförmåga hos stålet; f_{yd} = stålets dim. Hållfasthet = (i) standardvärde vid känd stålsort eller (ii) mäta på plats (förstörande provning); $A_{s,t}$ = stålets aktuella, lastbärande area (m²); och ϕt = stålets aktuella, lastbärande diameter (m).

$A_{s,t}$ = aktuell verksam area hos stålet = (ii) mäta på plats eller (iii) uppskattning med modell (oförstörande provning) eller framtida verksam area hos stålet = (iii) uppskattning med modell.

2.2.1 Samverkan betong – stål

När bergförankringen är kringgjuten i en betongkonstruktion, vilket oftast är fallet, uppstår en samverkan mellan betongen och förankringsstålet. I detta fall är det betongkonstruktionen som utövar lasten mot förankringsstålet och betongen ska kunna överföra denna last längs en förankringslängd, jämför [9] avsnitt 3.9.1.

$$R_{\text{betong-stål}} = \eta \cdot f_{ctd} \cdot A = \eta \cdot f_{ctd} \cdot \pi \cdot \phi \cdot L_{\text{förankr}} \quad (2-9)$$

där $R_{\text{betong-stål}}$ = bärförmåga hos fogen mellan betong och stål; η = beaktar förhållanden såsom stålytans jämnhet, undergjutningshöjd, stångavstånd, närhet till fri betongyta, etc; A = mantelarean hos fogen (m²); ϕ = förankringens diameter (m); $L_{\text{förankr}}$ = förankringslängd, se avsnitt 2.2.3; och f_{ctd} = dimensionerande draghållfasthet hos betongen runt förankringen.

Vid korrosion hos förankringen minskar diametern hos stålet men ekvationen ovan är det ursprungsdiametern som menas. Försvagningen p.g.a. korrosionen kommer snarare in i vidhäftningshållfastheten τ_{cd} som minskar.

2.3 Befintlig tillståndskontroll och uppföljning

Det finns idag ingen oförstörande metod för att bestämma tillståndet hos ett ingjutet förankringsstag, varken avseende dragkraftskapacitet eller ev. skada.

3 Tillståndsbedömning av bergförankring

Fem parametrar styr förankringen av en betongkonstruktion mot berg via förankringsstag, se avsnitt 2.2.

En bergförankrings bärförmåga R_{stag} kan sägas vara det minsta av följande värden:

$$R_{stag} = \min(R_{berg}, R_{bruk-berg}, R_{stål-bruk}, R_{stål}, R_{btg-stål}) \quad (2-4)$$

Dessa parametrar är kvantifierbara. Dock kan dessa parametrar enbart bedömas indirekt och kvalitativt i befintliga konstruktioner.

Detta kapitel inleds med en allmän presentation om fysikaliska och materialtekniska faktorer som inverkar en bergförankrings funktion över tid. Där efter (avsnitt 3.2 till 3.8) presenteras möjliga metoder för tillståndsbedömning av befintliga och nyproducerade förankringar.

3.1 Allmänt om inverkan faktorer

3.1.1 Allmänt

För att kunna uppskatta funktionen hos en bergförankring bör några eller alla av nedanstående faktorer analyseras:

- Bergets mekaniska egenskaper, sprickor, hållfasthet, geometri (för att uppskatta tyngden hos medverkande kon, vidhäftningen mellan kon och omgivande berg och vidhäftningen mellan borrhålsvägg och bruk)
- Bergets fysikaliska egenskaper (för att uppskatta transport av vatten, joner och syre)
- Brukets fysikaliska och mekaniska egenskaper (för att uppskatta hållfastheten nu och i framtiden)
- Stålets kvarvarande lastbärande area.

I senare avsnitt under denna rubrik (3.1.2 till 3.1.5) beskrivs närmare olika möjligheter för sådana analyser. I kapitel 5 beskrivs möjliga analyser med teoretiska modeller.

3.1.2 Bergets mekaniska egenskaper

- Antal sprickor, utbredning och koppling till varandra inom närmaste området runt förankringarna. Geometri mellan berget och dammen. För att kunna uppskatta medverkande volym och vidhäftningshållfasthet i konens ränder och inom konen (Figur 2-4).

Mätningar:

- Gamla dokument från byggnadstiden.
- Undersökningar i nya borrhål. Borrkärnor, filmning, etc.
- Geofysiska mätningar.

Experiment:

- Provdra ett antal mindre stag i berg, ev. finns mycket rapporterat samt kan erhållas via litteraturstudie.

Modeller:

- FEM: Smeared crack model, d.v.s. man gör om brottvillkor baserat på rörelse i en distinkt spricka till att gälla för töjning.
- FEM: diskreta sprickor t.ex. enligt "fictitious crack model" av Hillerborg [10].
- Handberäkning: diskreta sprickor

3.1.3 Bergets fysikaliska egenskaper

- Antal sprickor, utbredning och koppling till varandra inom närmaste området runt förankringarna. Geometri mellan berget och dammen. För att kunna uppskatta hur vatten, syre och joner transporteras genom berg och bruk.
- Transport av vatten genom berget kan erodera bort sammanhållande material i sprickor.
- Transport av syre genom berget kan degradera berget i vissa speciella fall, ex. svällberg som finns beläget i Jämtland.
- Transport av vatten till och genom bruket urlakar och försvagar detta.
- Transport av syre och joner till stålet kan medverka till korrosion.

Mätningar:

- Gamla dokument från byggnadstiden.
- Undersökningar i nya borrhål. Porvattentrycksmätningar, läckagemätningar, etc.

Modeller:

- FEM: "Smeared crack model", i detta fall menas beräkning av flöden i flera men lite större volymer.
- FEM: diskreta sprickor
- Handberäkning: diskreta sprickor

3.1.4 Brukets fysikaliska och mekaniska egenskaper

- Brukets aktuella egenskaper beror på brukets initiella egenskaper samt ev. nedbrytning med tiden, t.ex. p.g.a. urlakning eller frostsador.
- Transport av vatten genom bruket urlakar detta.
- Vid urlakning blir bruket porösare och mer permeabelt för vatten och joner.
- Vid urlakning sjunker hållfastheten i bruket och i fogarna mot dels borrhållsväggen och dels mot förankringsstålet.
- Vid urlakning sjunker pH i bruket varvid stålet får ett sämre korrosionsskydd.
- Urlakning underlättar transport av syre och joner till stålet, som därmed ökar risken för korrosion.
- Bruket kan även degraderas av tillströmmande salter, t.ex. sulfater.

Mätningar:

- Förstörande provning vid gamla, ej längre nödvändiga, stag.
- Boltometer
- Uttdragstest

Experiment:

- Injektera ett antal bultar i fält eller i lab.
- Låta genomströmma av vatten och exponeras för syre.
- Efter experimentets slut, såga, väg, kemi, spräck, etc.

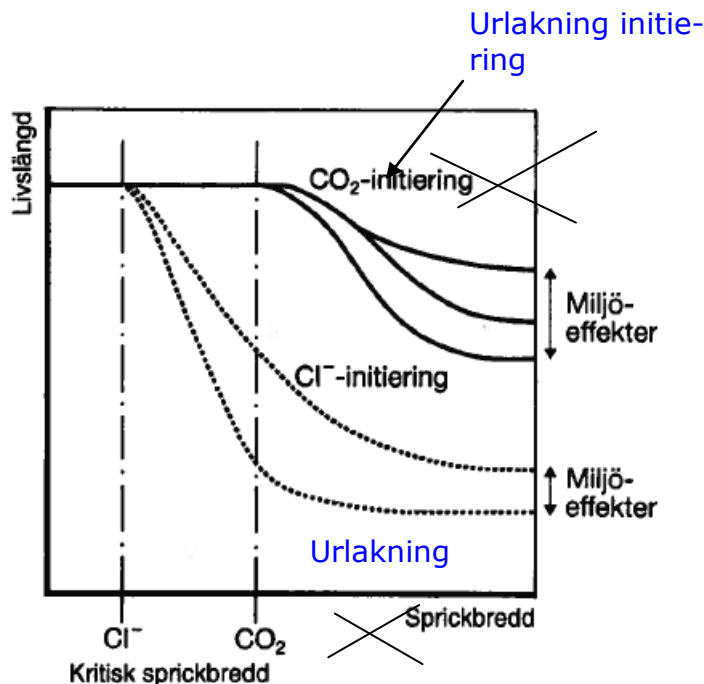
Modeller:

- Multifysikmodell i FEM med flera fysikmoder som med- och samverkar (om man vill spänna bågen djärvt). Transport av vatten, syre, joner. Kemiska reaktioner urlakning, stålkorrosion. pH funktion av OH⁻-joner. Porositet funktion av urlakning. Hållfasthet funktion av porositet.
- Även temperaturmodell kan vara med för att utröna risk för frostsador hos bruket.

3.1.5 Stålets mekaniska egenskaper

- För att kunna uppskatta stålets lastbärande area.

Naturligtvis är korrosionsförloppet hos bergförankringar beroende av hur snabbt omgivande, skyddande bruk urlakas och pH sänks, hur snabbt vatten, syre och ev. aggressiva joner kan diffundera fram till stålet. Vid sprickor i berget, mellan berg och damm samt i omgivande bruk Figur 3-1 kan detta gå snabbare. Ju större sprickor/spalter desto snabbare kan korrosionsförloppet gå, se Figur 3-1.



Figur 3-1 Principiell bild fritt efter [11]: Kritisk sprickbredd är beroende av omgivande miljöns aggressivitet. Om sprickbredden ökar, ökar urlakningen och stålets ytskydd försämras varvid livslängden minskar.

Mätningar:

- Förstörande provning vid gamla, ej längre nödvändiga, stag.

Experiment:

- Injektera ett antal bultar i fält eller i lab, se ovan.
- Mätningar genom stålet?

Modeller:

- Multifysikmodell av omgivande berg och bruk i FEM enligt ovan ger pH, joner och syre vid stålet.
- Korrosionsstart som funktion av ovan.
- Multifysikmodell FEM för stålet: Korrosionspropagering. Diffusion av syre, vatten och joner genom ett allt tjockare rostsikt fram till stålet.

3.2 Boltometer

-Principiell beskrivning av mätmetoden:

Boltometern är ett elektroniskt instrument som används för icke förstörande undersökningar av ingjutna bergbultars tillstånd [12]. Boltometern skickar elastiska vågor in i bultens ena ände och en reflektion av vågorna sker i bultens andra ände. De reflekterade vågorna registreras av Boltometern. Utse-

endet av den reflekterade vågen påverkas av själva bulten och av ingjutningsbruket runt bulten samt av det omgivande berget.

-Fysikalisk princip:

För att alstra och känna av dessa vågor används piezoelektriska kristaller. När man lägger på en elektrisk spänning på en sådan kristall, utvidgar sig kristallen i proportion till spänningen. Utsätts kristallen för tryck, avger den en elektrisk laddning i proportion till trycket.

-Materialegenskap som mäts:

För en bult som enbart har kontakt med luft eller vatten kommer enbart bulten att fungera som vågledare. Vågorna överförs inte till omgivande berg utan reflekteras från bultens ena ände tillbaka till andra bultändan och sedan ut till boltometern, se Figur 3-2 A. En bult som är fullständigt ingjuten med anläggningscement i berg fungerar gränsytan mellan cement och berg som en vågledare för en stor del av vågorna. En mindre del av vågorna går dock ut i berget, se Figur 3-2 B. I en porös betong reflekteras endast en mindre del av vågenergin tillbaka till bulten. Större delen av energin försvinner ut i berget, se Figur 3-2 C. Om en bult gjuts in i en betongkonstruktion eller en stor volym cementpasta finns ingen vågledare runt bulten. Ingen energi reflekteras då tillbaka till bulten. Vågenergin dämpas snabbt i det homogena materialet vilket resulterar i inget eko kan registreras av boltometern, se Figur 3-2 D.

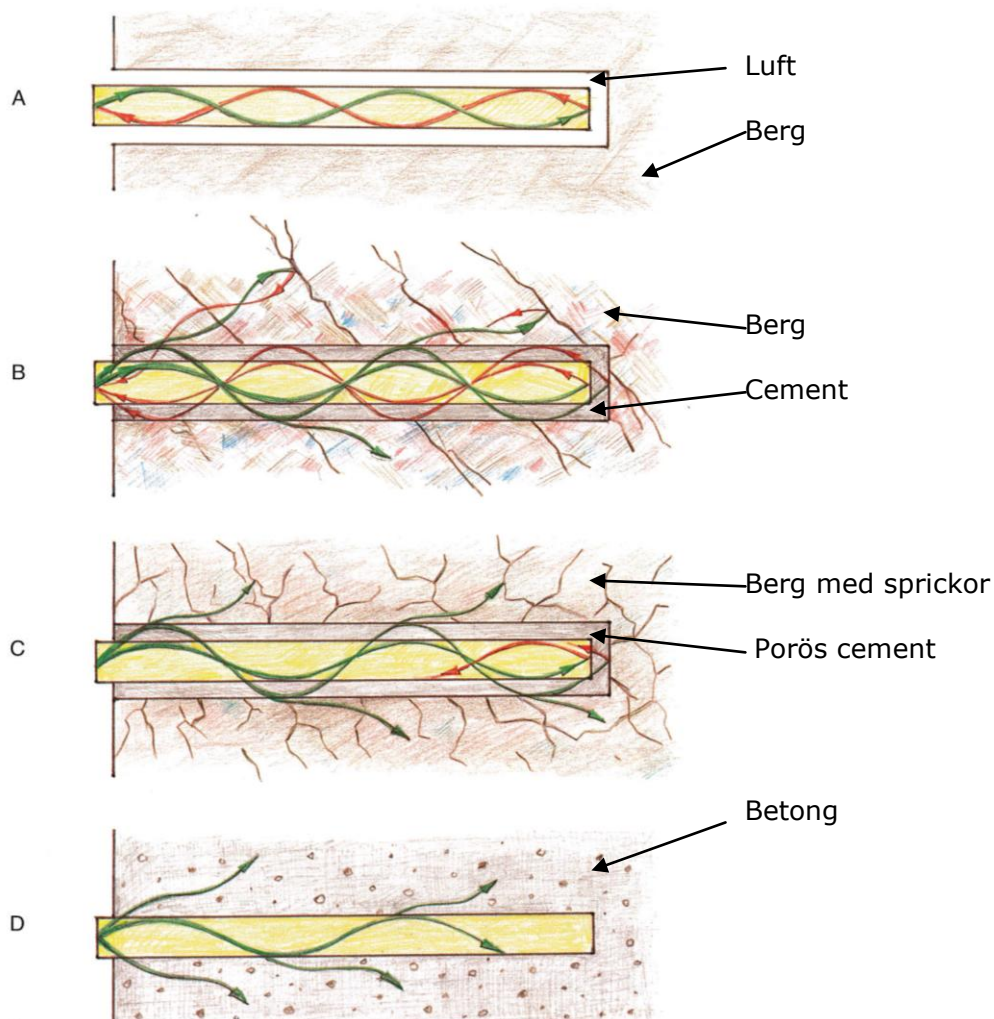
Under förutsättning att vågens gånghastighet är känd kan bultens längd beräknas från tidsskillnaden mellan alstrandet vågen och mottagandet av ekot från bultens innerände. Under förutsättning att bultens längd är känd kan ingjutningens kvalitet bedömas från graden av dämpning av vågen.

-Vilka egenskapsförändringar kan detekteras:

Från Vattenfall Krafts undersökning 1997 för bestämning av boltometerns tillförlitlighet utfördes mätningar på ca 900 ingjutna bergbultar. Av dessa undersökningar framgår det att boltometern klarar, vid en känd bultlängd och med en erfaren operatör, tolka ingjutningens kvalitet upp till ca 3 meter långa bultar. Om bergbulten har ingen eller en mycket dålig ingjutning utökas boltometerns räckvidd väsentligt. Under vissa förhållanden kan således en frånvaro av ingjutning konstateras hos 6 meter långa och t o m ännu längre bultar.

-För och nackdelar med metoden:

Avslutningsvis kan sägas att Boltometern har i princip gjort det möjligt att undersöka tillståndet hos ett önskat antal bergbultar i en anläggning och därmed öppnat vägen för att, i kombination med andra observationer, utföra en analys och bedömning av säkerheten hos ett bultbestånd. För gamla bultar med okända parametrar befinner sig dock mycket ännu på utvecklingsstadiet. Om bultlängden är känd (gäller bultar under 3 meter) kan klart godkända respektive underkända, ingjutningar bestämmas.



Figur 3-2 Schematisk skisser för utbredning av alstrade vågor från boltterminalen i bultar omgivna av olika miljöer.

3.3 Bedömning av stagstålets status med ultraljud

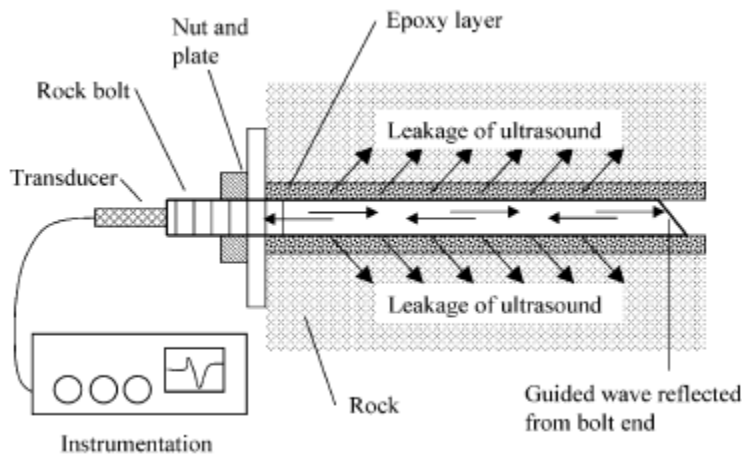
-Principiell beskrivning av mätmetoden:

Ultraljudundersökningar utförs oftast som puls-eko mätningar men kan också utföras som transmissionsmätningar när sändare och mottagare befinner sig på olika sidor av objektet. Mätningen är ekots ankomsttid eller styrka.

-Fysikalisk princip:

Sändaren innehåller ett piezoelektriskt material som kan omvandla en elektrisk signal till en mekanisk vågrörelse och tvärtom. De mekaniska vågorna fortplantas i materialet med en hastighet proportionell mot E-modulen. En transducer kan konstrueras för att sända och mottaga kompressionsvågor

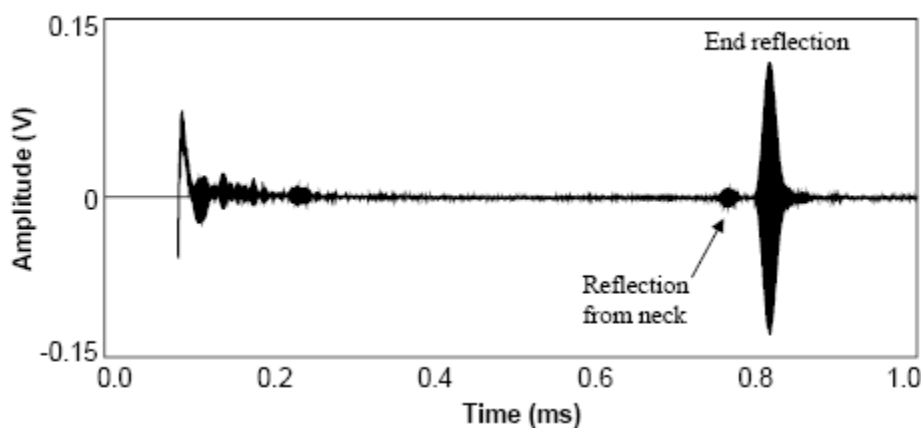
eller skjuvvågor, se Figur 3-3. De senare har ofta en hastighet som uppgår till c:a hälften av de förra.



Figur 3-3 Illustration av ultraljudets utbredning. För vissa frekvenser läcker ultraljudet ut ur bulten, för andra stannar det inom bulten. Den ingjutna bultändens form har stor betydelse för resultatet. Helst skall den vara helt plan och vinkelrät mot bulten [13].

-Materialegenskap som mäts:

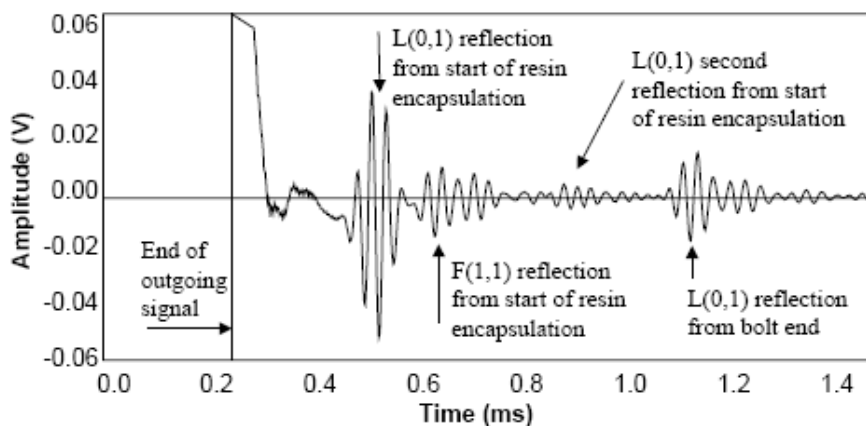
I ett stagstål är den intressanta mätparametern ekon från avbrott i staget. Genom att man känner till att ljudhastigheten för kompressionsvågor i stål är c:a 5000 m/s kan man genom ekots ankomsttid avgöra avbrottets läge, se Figur 3-4.



Figur 3-4 3.86 MHz Ultraljudpuls lämplig för att bestämma bultens längd [13].

-Vilka egenskapsförändringar kan detekteras:

Ultraljudmätning i dragstag kräver att staget har en fri ände, dvs att det inte är ingjutet, se Figur 3-3. Man slipar då till den fria ändytan så att den blir jämn. En transducer som fungerar både som sändare och mottagare anbringas mot staget. Man kan använda fett eller vax för att skapa nödvändig akustisk kontakt mellan staget och transducern. När den mekaniska vågen utbreder sig längs staget kommer energi att reflekteras när den akustiska impedansen ändras. Det sker om t ex staget är avrostat eller om ingjutningsbruket innehåller s.k. råttbon, se 3-5.



Figur 3-5 35 kHz ultraljud (6 cykler) lämplig för att bestämma ytkorrosion i bulten [13].

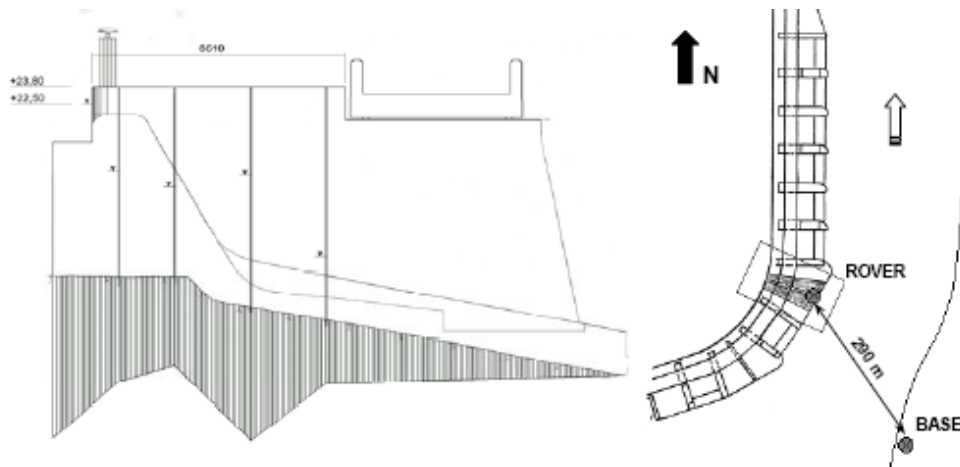
-För och nackdelar med metoden:

Metoden är lätt att använda och den enda nackdelen, förutom att stagen kan vara ingjutna, är att det kan vara besvärligt att skapa tillräckligt god kontakt mellan transducer och mätobjekt.

3.4 Bedömning av förankringens status med hjälp av dammkrönets förskjutning

-Principiell beskrivning av mätmetoden:

En punkt av intresse på dammkrönet positionsbestäms relativt en punkt som kan antas fixerad i omgivningen. Positionsförändringen av dammkrönet som funktion av vattennivån i dammen registreras. Dessa mätningar kan göras genom optisk avståndsmätning eller med hjälp av ett par noggranna GPS-mottagare, se Figur 3-6.



Figur 3-6 Differentiell GPS-mätning med rover på dammkrön och basstation på magasinets motstående strand, utanför laboratoriebyggnaden i Älvkarleby [14].

-Fysikalisk princip:

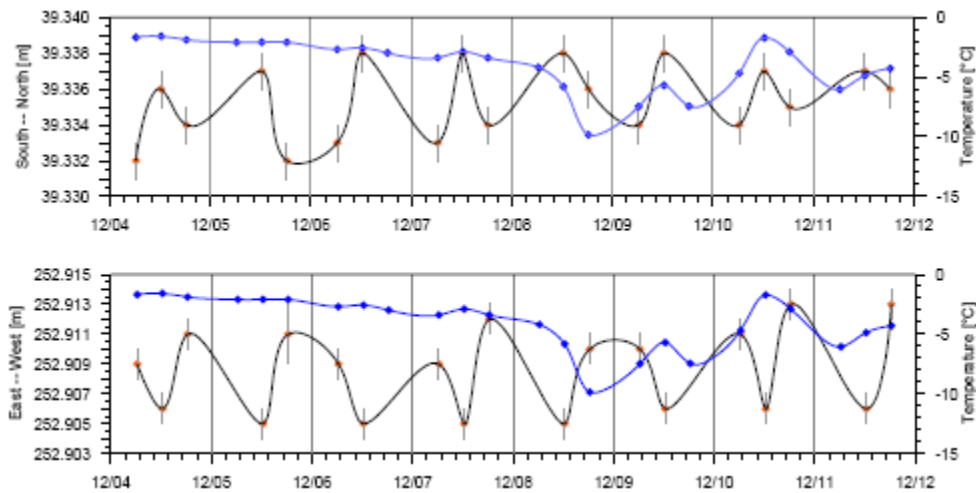
Dammkrönets rörelse är beroende av betongkonstruktionens elasticitet och infästningsgraden. Den senare är en funktion av förankringens egenskaper. Om man beräkningsmässigt kan få fram de elastiska rörelserna kan man genom mätningarna få fram om förankringen fungerar som avsett.

-Materialegenskap som mäts:

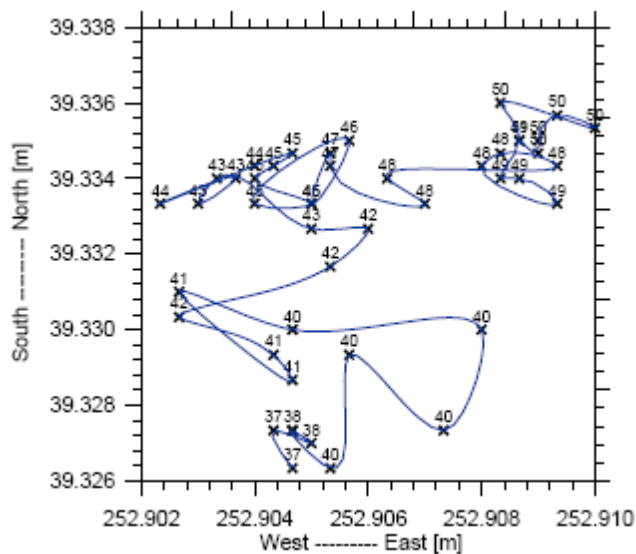
Det man kan mäta är den kombinerade effekten av betongkonstruktionens elastiska rörelse och förankringens styvhet.

-Vilka egenskapsförändringar kan detekteras:

I sin doktorsavhandling gjorde Christian Bernstone [14] mätningar av dammkrönets rörelser när magasinet i Älvkarleby ändrade nivå, se Figur 3-7 och Figur 3-8. Detta gjordes med hjälp av optiska längdmätare som förankrats på södra stranden, invid laboratoriet. Resultatet blev kontraintuitivt däri att dammkrönet rörde sig uppströms när magasinnivån höjdes och vice versa. Detta har sin förklaring däri att magasinets botten tyngs ner av den ökade vattenmassan och att det då bildar ett tråg med kanter som lutar inåt magasincentrum, dvs uppströms. Betongkonstruktionen följer med i denna rörelse.



Figur 3-7 Daglig variation i betongdammkrönsposition (Älvkarleby). Blå kurva är temperaturvariationen [14].



Figur 3-8 Damkrönets rörelse under veckorna 37-51 [14].

-För och nackdelar med metoden:

Att mäta deformationen ger ett "totalvärde" som inbegriper flera olika orsaker till rörelse, varav en kan vara förändrad status hos bergstag. Det kan dock vara svårt att utifrån resultatet klargöra de enskilda orsakerna till deformationerna och detektera det tillskott som förankringsstagen ger. Andra faktorer som påverkar rörelserna, som t.ex. temperaturvariationer, vattenlast mm, kan vara så dominerande så att tillskottet från förändrat tillstånd hos stagen kan vara svårt att detektera.

3.5 Bedömning av stålets status med hjälp av röntgen

-Principiell beskrivning av mätmetoden:

Vid radiografiska mätningar appliceras på ena sidan av den konstruktion som ska kontrolleras en strålkälla i form av en röntgengenerator. En fotoplåt på motsatta sidan tar emot strålningen och en närmast fotografisk representation av de transmitterade strålningsnivåerna erhålls.

-Fysikalisk princip:

För att utföra en radiografisk mätning behövs alltså inte något radioaktivt element utan strålningen genereras vid exponeringstillfället. För att utföra mätningar behövs utöver strålkällan ett fotolaboratorium för behandling av bilder. Säkerhetsarrangemangen vid mätning inskränker sig till själva exponeringen då säkerhetsavstånd på cirka 100 m erfordras.

-Materialegenskap som mäts:

Vid en radiografimätning fås direkt en fotografisk avbildning av strålningsintensiteten genom materialet.

-Vilka egenskapsförändringar kan detekteras:

Potentialen för radiografi ligger i detaljgranskning av utvalda områden av en konstruktion.

-För och nackdelar med metoden:

Radiografi kan användas på konstruktionsdelar med upp till en meters tjocklek, vilka är tillgängliga från två motstående sidor. Kapaciteten vid kontroll begränsas av tunga materialtransporter och tidskrävande etablering vilket tillsammans leder till att maximalt 70 bilder av strukturen beräknas kunna tas under en mätvecka [15] [16] [17].

3.6 Bedömning av bergets status via borrar

En vanlig metod att kontrollera bergets och ovanliggande betongs status är att borra ut borrhälar och okulärt bedöma bergets kvalitet genom att studera betongkärnor och/eller filma borrhålet. Det är en väl etablerad metod.

-Principiell beskrivning:

Borring med kärnborr vars skärande änden är försedd med industriellt framställda diamantpartiklar. Uttagna kärnor placeras i låda avsedd för prov. På lådans kant markeras djup och eventuell kärnförlust. Kärnförlust markeras även med virkesbit eller liknande, se Figur 3-9.



Figur 3-9 Borrkärnor från zonen mellan berg och betong.

-Materialegenskap som mäts:

Från provningen erhålls egenskaper som mineral, sprickförekomst och kärnförlust. Kärnorna kan utöver ren okulär kontroll även användas till hållfasthetsprovning eller annan provning. Hålet kan användas till vattenförlustmätning som ger ytterligare information om sprickor i berget.

-För och nackdelar med metoden:

Den stora fördelen är att metoden är direkt det är det verkliga bergets egenskaper som studeras. Den främsta nackdelen är att själva borrningen inte alltid är genomförbar av praktiska skäl. Borrningen är även relativt kostsamt.

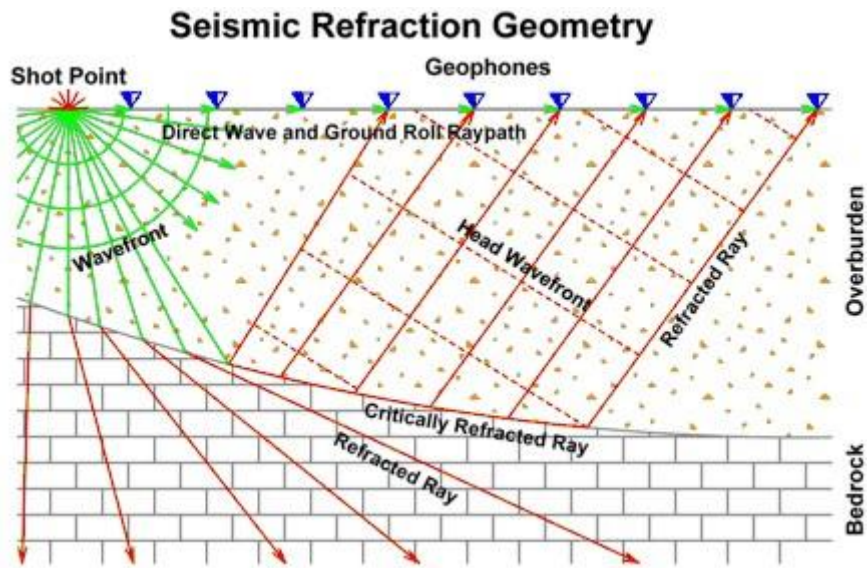
3.7 Bedömning av bergets status med hjälp av seismik

-Principiell beskrivning av mätmetoden:

Med seismik avses undersökning av ett objekt med lågfrekventa mekaniska vågor, typiskt i intervallet 50-500 Hz.

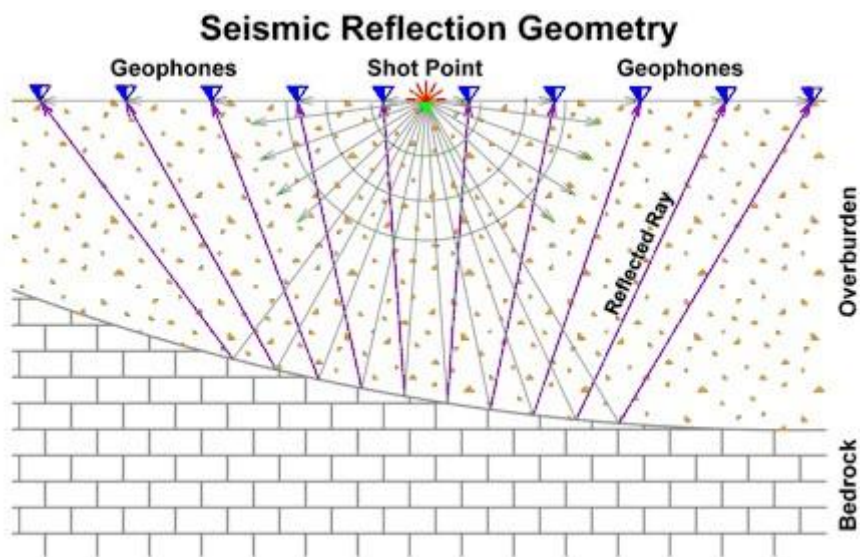
-Fysikalisk princip:

Principen är densamma som för transmissionsmätning med ultraljud. Ljudvågor alstras i en punkt och registreras i andra punkter. Vid refraktionsmätningar registreras vågornas ankomsttid som funktion av avståndet från skottpunkten och man studerar hur hastigheten varierar mellan geofonerna, se Figur 3-10.



Figur 3-10 Seismisk Refraktionsmätning. Man kan bestämma lagertjocklekar och gånghastigheter i de olika lagren. De senare indikerar bergkvaliteten. Vanligt förekommande vid markundersökningar [18].

Vid reflektionsmätningar används mer högfrekventa geofoner och man studerar reflexer som kommer nedifrån upp mot markytan, se Figur 3-11.



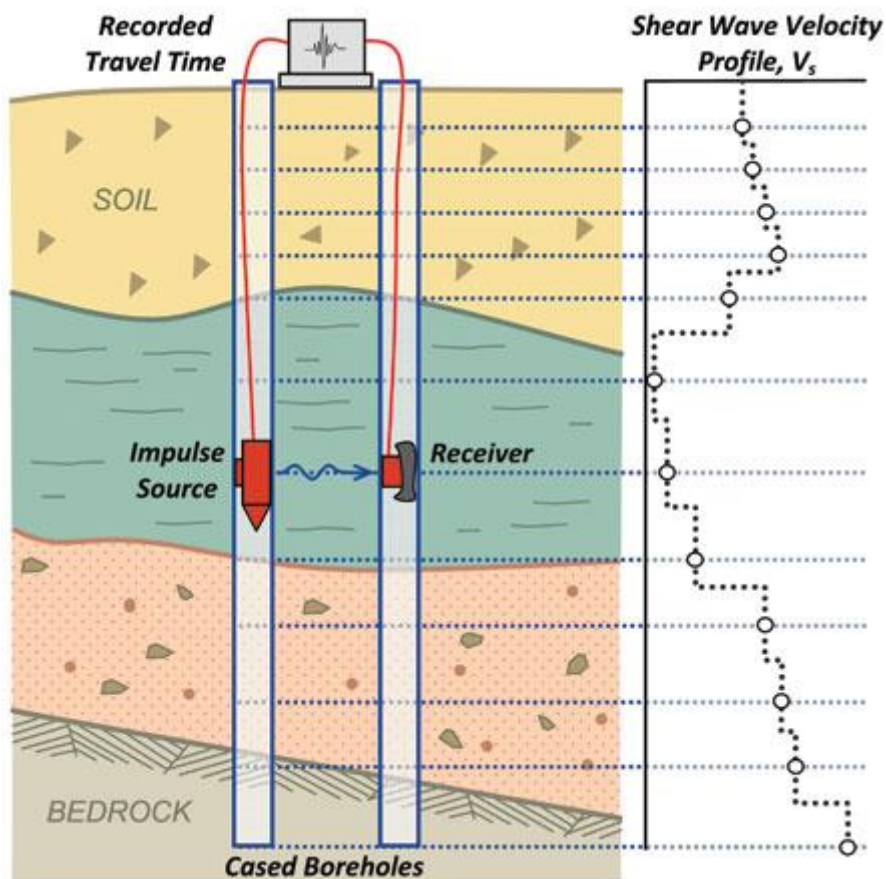
Figur 3-11 Seismisk reflexionsmätning. Man kan bestämma lagerföljder. Sällsynt använd vid markundersökningar på ringa djup. Vanlig vid oljeprospektering [18].

-Materialegenskap som mäts:

Den egenskap man mäter är hastigheten för mekaniska vågor i materialet och avståndet till diskontinuiteter i denna hastighet. Olika material har olika hastigheter för mekaniska vågor. Beroende på tvärkontraktionstalets värde har skjuvvågor lägre hastighet än kompressionsvågor.

-Vilka egenskapsförändringar kan detekteras:

Det är möjligt att bestämma variationer i bergkvalitet längs en sträcka, men det går inte att bestämma hållfasthetsvärden, då det finns flera obekanta. Bergmassans mekaniska egenskaper under en damm kan bedömas genom sk cross-hole mätningar, se Figur 3-12. Det kräver att man har tillgång till två borrhål. Genom att släppa ner en seismisk sändare i det ena hålet och en seismisk mottagare i det andra kan man genom att mäta ett stort antal kombinationer av sändar- och mottagarpositioner räkna fram en tomografisk bild som åskådliggör bergmassans kvalitet. Det man kan få fram är ljudhastighetsfördelningen mellan borrhålen och dämpningen av ljudet. Varje parameter ger upphov till en bild av bergmassans kvalitet.



Figur 3-12 Illustration av cross-hole mätningar mellan två borrhål [19].

-För- och nackdelar med metoden:

De seismiska metoderna är de enda som utnyttjar en princip som direkt kopplar till materialets hållfasthetsegenskaper. Försämrade kvalitet nere i berget medför en sänkning av ljudhastigheten och då får man den ogynnsamma situationen att berg med hög ljudhastighet ligger ovanpå berg med låg ljudhastighet. Då kan det vara svårt att få information om låghastighetslagrets egenskaper, för det framträder inte i registreringarna eftersom det maskeras av signaler från det goda berget. Metoden är relativt komplicerad att använda.

3.8 Bedömning av brukets status med ultraljud

-Principiell beskrivning av mätmetoden:

Metoden går ut på att lågfrekvent ultraljud skickas längs staget som är ingjutet i bruket. Det blir mer entydig signalutbredning i staget om låga frekvenser används. Beroende av brukets kvalitet och bindningen till stången kommer ultraljudet att läcka ut i bruket i olika proportioner. Vid abrupta förändringar skapas reflektioner.

-Fysikalisk princip:

Ultraljud som utbreder sig i ett medium reflekteras när det stöter på en stark impedanskontrast, t ex en ihållighet i bruket

-Materialegenskap som mäts:

Brukets impedans, vilken är beroende av dess densitet och elasticitetsmodul

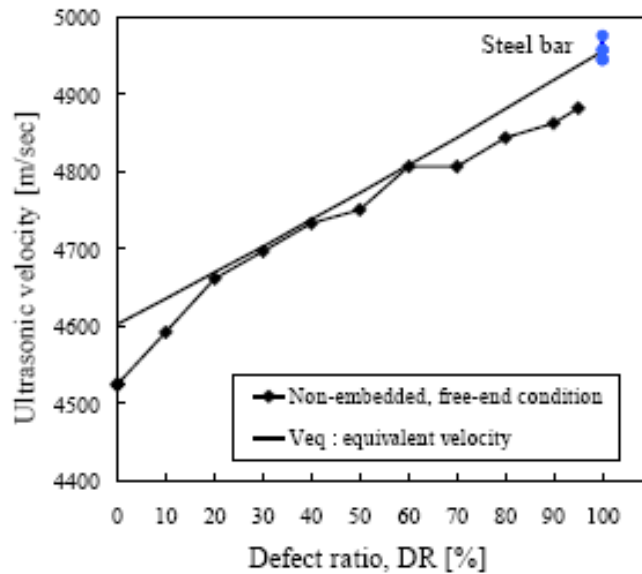
-Vilka egenskapsförändringar kan detekteras:

Hållrum. Eventuellt kan vidhäftningen längs staget bedömas med hjälp av styrkan från det i motstående ändpunkt reflekterade ultraljudet. Detta är dock spekulativt.

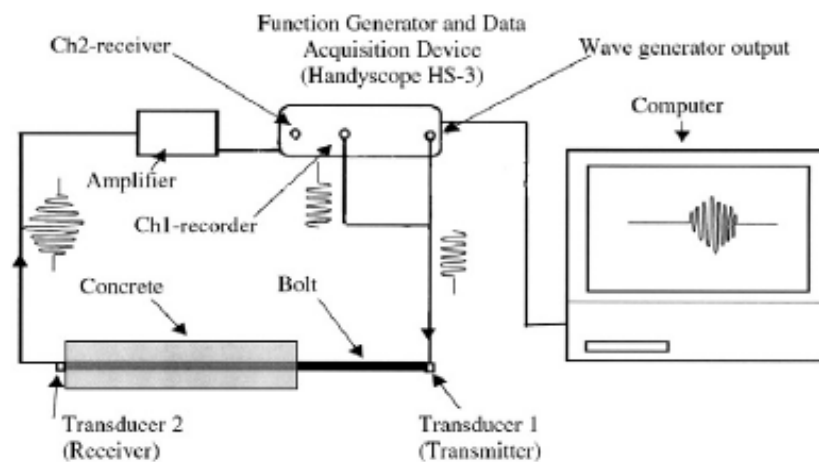
-För och nackdelar med metoden:

Fördelen är ju att det knappast finns någon annan oförstörande provningsmetod som kan användas. Nackdelen med metoden är att denna i dagsläget ej är "etablerad", samt att det kan vara svårt att komma åt en ändpunkt på dragstaget om det är ingjutet. Därpå krävs det ytbehandling av den frilagda ändpunkten för att effektivt kunna sända in ultraljud i staget.

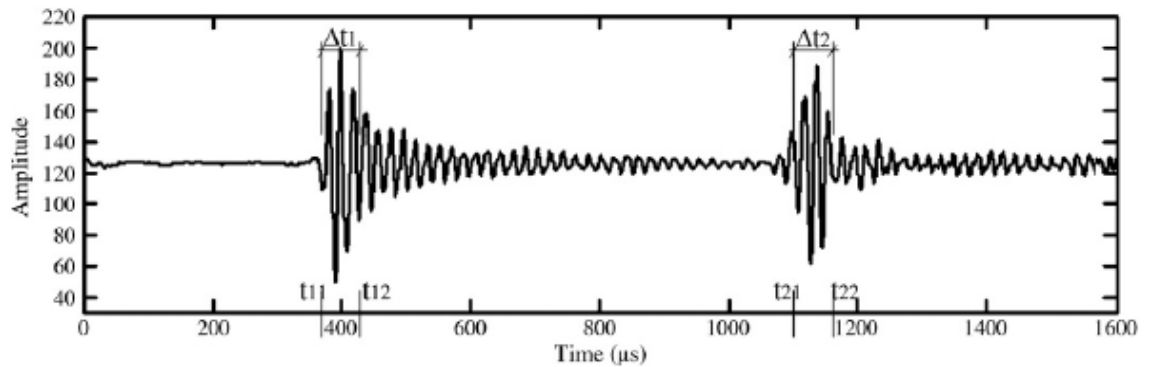
I följande figurer visas hur ultraljud kan användas för att undersöka dragstag. I Figur 3-13 visas hur ljudhastigheten i dragstaget ökar då vidhäftningen mot bruket minskar. Känner man till stagets längd kan det vara en indikator, annars kan man inte beräkna ljudhastigheten. I Figur 3-14 visas hur man kan använda ett eko som studsar fram och tillbaka i staget för att bestämma dämpningen (Amplitude Ratio). Hur signalen kan se ut framgår av Figur 3-15. I Figur 3-16 och Figur 3-17 visas hur dämpningen påverkas av betongens hållfasthet respektive luftinnehåll för olika frekvenser på ultraljudet.



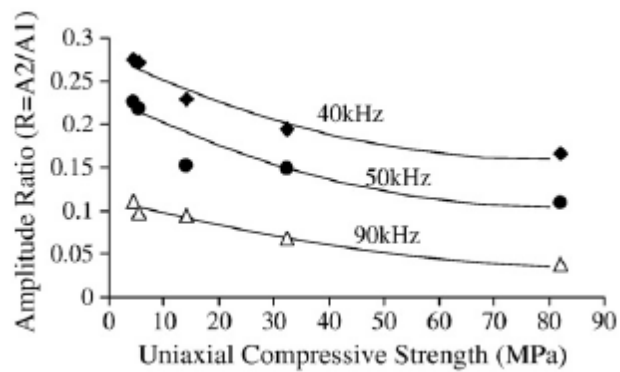
Figur 3-13 Med ökande defekter ökar hastigheten [20].



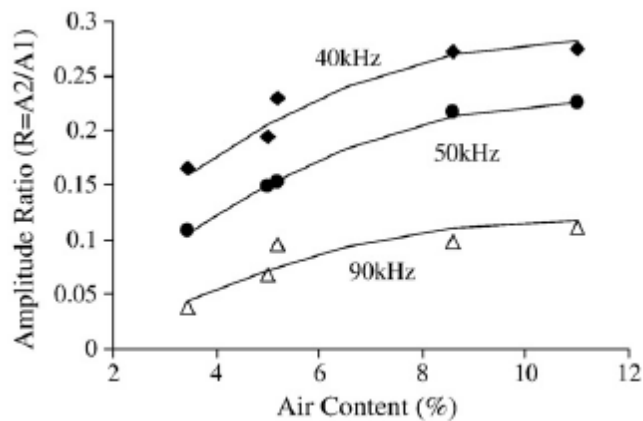
Figur 3-14 Försökuppställning för att testa inverkan av brukets kvalitet. Amplitudkvoten beräknas från amplituderna vid transducer 2 den först ankommande signalen och det första följande ekot, se nedan [21].



Figur 3-15 Först ankommande signalen och det första följande ekot [21].



Figur 3-16 Inverkan av tryckhållfastheten [21].



Figur 3-17 Inverkan av luftinnehåll [21].

4 Förberedelse för övervakning av bergförankringar vid nyproduktion

I kapitel 3 beskrevs möjliga metoder för tillståndsbedömning av befintliga och nyproducerade förankringar. I detta kapitel presenteras specifikt möjliga metoder som lämpar sig för nyproduktion.

4.1 Bedömning av stålets status med hjälp av sond

-Principiell beskrivning av mätmetoden:

SCS Engineering AB har utvecklat en korrosionssond för indikering av frätgropsdjup på naturgasledningar [22], se Figur 4-1. Ett annat användningsområde skulle kunna vara övervakning av metallkonstruktioner i vatten, jord eller i betong.

-Fysikalisk princip:

Korrosionssonden som består av ett tunnväggigt stålrör (0,3 mm) är fyllt med kvävgas eller tryckluft och trycksatt till ca 10 bar. Korrosionssonden kan t ex gjutas in i en betongkonstruktionen och varvid gastrycket i sonden mäts kontinuerligt. Vid en genomfrätning av sonden sker ett kraftigt tryckfall i sonden. Den maximala korrosionshastigheten hos sonden kan då enkelt bestämmas utifrån exponeringstid och godstjockleken hos korrosionssonden. I Figur 4-1, Figur 4-2 och Figur 4-3 visas ett exempel på olika typer av korrosionssonder som används för kontinuerlig övervakning av lokal korrosion.

-Materialegenskap som mäts:

Sonden öppnar möjligheten att på ett enkelt och tillförlitligt sätt få en indikering av korrosionsangrepp (gropfrätning) på t ex ingjutna stålkonstruktioner som t.ex. armering och spännkablar hos viktiga infrastrukturanläggningar.

-Vilka egenskapsförändringar kan detekteras:

Metoden innebär att olika materials känslighet för lokal korrosion (gropfrätning) i olika miljöer kan bestämmas.

-För och nackdelar med metoden:

Fördelen med metoden är att den är enkel att installera och mätresultaten är enkla att avläsa och tolka. Nackdelen är att endast genomfrätningar kan mätas. Vid genomfrätning är sonden förbrukad.



Figur 4-1 Korrosionssond för indikering av frätgropsdjup hos naturgasledningar.



Figur 4-2 Övre del av mätsond för bestämning av gropfrätningshastighet i betong.



Figur 4-3 Nedre del av mätsond för bestämning av gropfrätningshastighet i betong.

4.2 Bedömning av stålets status med hjälp av resistans mätning

-Principiell beskrivning av mätmetoden:

Elektriska resistanssensorer finns kommersiellt, framförallt för mer korrosiva miljöer, se Figur 4-4 [25].



Figur 4-4 Resistanssensor (Rohrback), den övre blanka metallslingan är lackerad och utgör referens.

-Fysikalisk princip:

Med elektriska resistanssensorer mäts resistansen hos ett tunt metallskikt. När metallskiktets tjocklek minskar genom korrosion kommer resistansen att öka.

-Materialegenskap som mäts:

Med den beskrivna metoden kan korrosionsförloppet för olika metaller följas, i princip vilken metall som helst, som kan läggas som ett tunt ytskikt på glas. I praktiken är urvalet begränsat till sådana metaller där jämn korrosion dominerar, metaller utsatta för lokala angrepp t.ex. gropfrätning ger missvisande resultat. Vanligast är koppar och silverbelagda sensorer. Även kolstål och zink förekommer.

-Vilka egenskapsförändringar kan detekteras:

Resistanssensorer kan alltså användas i miljöer med låg förväntad korrosionshastighet. Eftersom man med denna metod mäter korrosionen direkt ger eventuella dammpartiklar eller andra ytföroreningar inga mätfel. Inte heller fuktfilmer på ytan stör (så länge den bildade fuktfilmen inte orsakar läckströmmar vid resistansmätningarna), d.v.s. man har inget beroende av luftfuktigheten. Genom mätning relativt en referens av samma material kompenseras för resistivitetsens temperaturberoende.

-För och nackdelar med metoden:

Metoden är begränsad till sådana metaller där jämn korrosion dominerar. Metaller utsatta för lokala angrepp t ex gropfrätning ger missvisande resultat.

4.3 Bedömning av stålets status med hjälp av koaxialkabel

-Principiell beskrivning av mätmetoden:

Metoden bygger på att man ansluter en s.k. Time Domain Reflectometer TDR till en koaxialkabel. TDR sänder ut en mycket kort puls på koaxialkabeln och registrerar alla reflexer.

-Fysikalisk princip:

När den på koaxialkabeln utskickade impulsen stöter på en impedansskillnad, skapad av att koaxialkabeln har deformerats, kommer en del av impulsens energi att reflekteras tillbaka till TDR-instrumentet som en liten puckel på signalen. Eftersom hastigheten i den odeformerade koaxialkabeln är känd, kan man därigenom bestämma avståndet till den punkt där koaxialkabeln deformerats.

-Materialegenskap som mäts:

Man mäter deformation, närmare bestämt koaxialkabelns hopklämning eller avskjuvning.

-Vilka egenskapsförändringar kan detekteras:

Rörelser som påverkar koaxialkabelns tvärsnitt. Genom att förlägga en sådan kabel parallellt med ett dragstag skulle man kunna undersöka om staget t ex skjuvats av. Detta är dock ett mindre troligt skadefall eftersom det skulle innebära rörelser uppgående till flera cm, vilket sannolikt skulle medföra synliga skador på dammkonstruktionen.

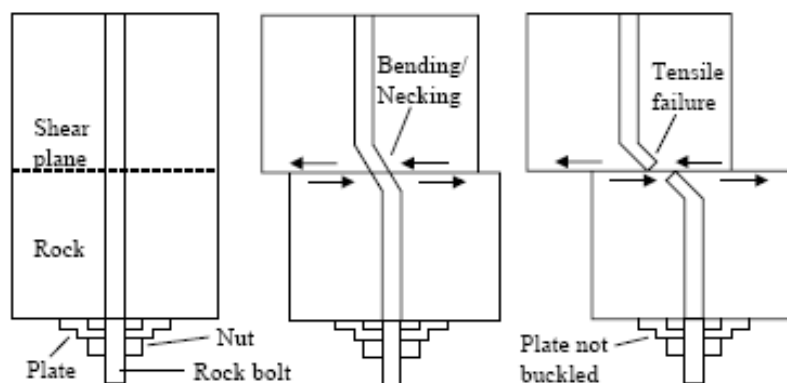
-För och nackdelar med metoden:

Metoden är lämpad för permanent installation. Ett TDR-instrument kan kombineras med en multiplexer som kopplar in olika koaxialkablar till ett enda instrument. Därigenom är denna metod lämpad för helautomatiserade mätningar som kan ligga till grund för långa tidsserier, mer om detta i nästa avsnitt. Det är inte sannolikt att korrosion i stålet kan detekteras med denna metod.

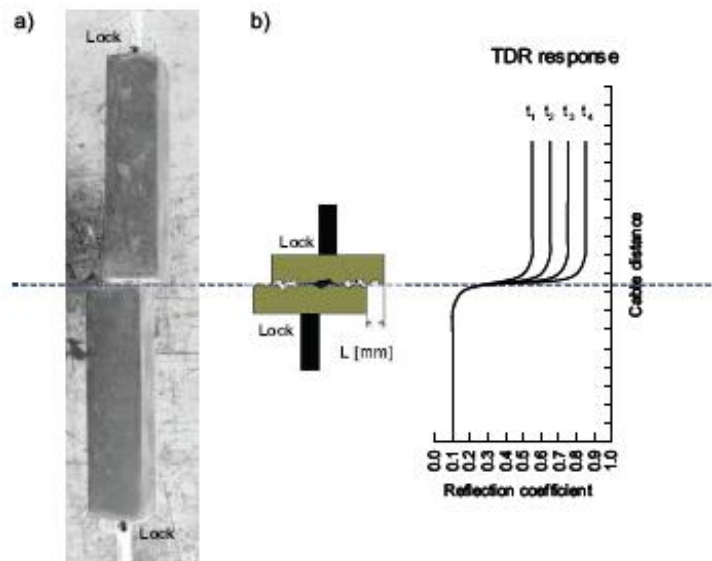
-Anmärkning:

Christian Bernstone [14] redovisar i sin doktorsavhandling försök med grov koaxialkabel som indikator för förskjutningar i betong.

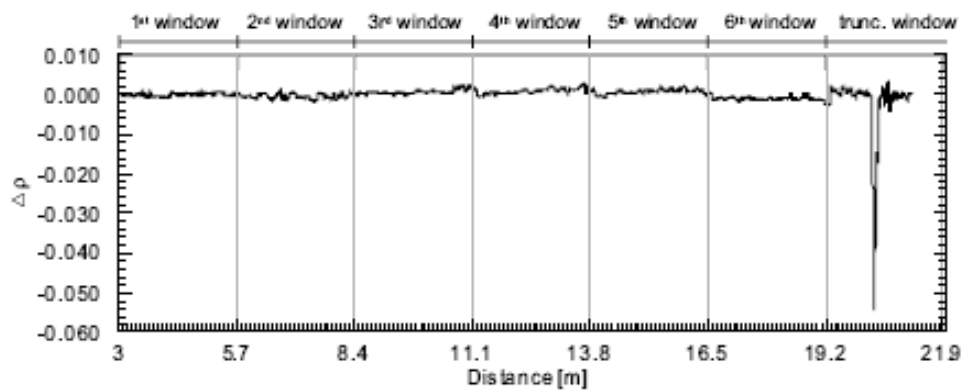
I de följande figurerna illustreras hur mätningar med koaxialkabel går till. I Figur 4-5 visas hur koaxialkabeln skjuvas av då provet deformeras. I Figur 4-6 visas hur deformationen påverkar TDR-signalen - reflektionskoefficienten blir starkare (negativ) ju större deformationen blir. I Figur 4-7 visas hur man med TDR kan avgöra hur långt in på koaxialkabeln brottet äger rum. Slutligen i Figur 4-8 visas hur stor deformationen måste vara för att kunna upptäckas på olika avstånd. Ju längre bort deformationen inträffar desto större måste den vara för att kunna upptäckas.



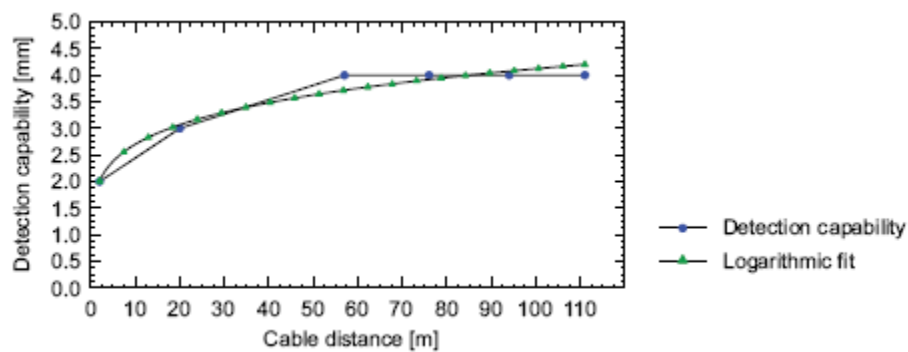
Figur 4-5 Illustration av hur ett dragstag skjuvas av [13].



Figur 4-6 Laboratorieförsök med avskjuvning av koaxialkabel [14].



Figur 4-7 Signal från TDR-instrument som visar att det föreligger ett avbrott vid 20 m [14].



Figur 4-8 Detektionsmöjligheter vid olika avstånd från mätstället [14].

4.4 Bedömning av stålets status med hjälp av ultraljud

-Principiell beskrivning av mätmetoden:

Ultraljudundersökningar skulle för detta fall utföras som puls-eko mätningar. En transducer skulle monteras permanent i stagets ena ändpunkt Figur 4-9 Illustration av hur en ultraljudtransducer kan anbringas på dragstagets fria ände [13]. Därefter kan i princip transducern gjutas in i betongen. Den metoden har dock nackdelen att om transducern går sönder kan den inte bytas ut. Mätsignalen är ekots ankomsttid eller styrka.

-Fysikalisk princip:

Sändaren innehåller ett piezoelektriskt material som kan omvandla en elektrisk signal till en mekanisk vågrörelse och tvärtom. De mekaniska vågorna fortplantas i materialet med en hastighet proportionell mot E-modulen. En transducer kan konstrueras för att sända och mottaga kompressionsvågor eller skjuvvågor. De senare har ofta en hastighet som uppgår till c:a hälften av de förra.

-Materialegenskap som mäts:

I ett stagstål är den intressanta mätparametern ekon från avbrott i staget eller kraftiga tvärsnittsminskningar pga korrosion. Genom att man känner till ljudhastigheten för kompressionsvågor i stål är c:a 5000 m/s kan man genom ekots ankomsttid avgöra avbrottets läge.

-Vilka egenskapsförändringar kan detekteras:

När den mekaniska vågen utbreder sig längs staget kommer energi att reflekteras när den akustiska impedansen ändras. Det sker om t ex staget har gått av, är avrostat eller om ingjutningsbruket innehåller s.k. råttbon.

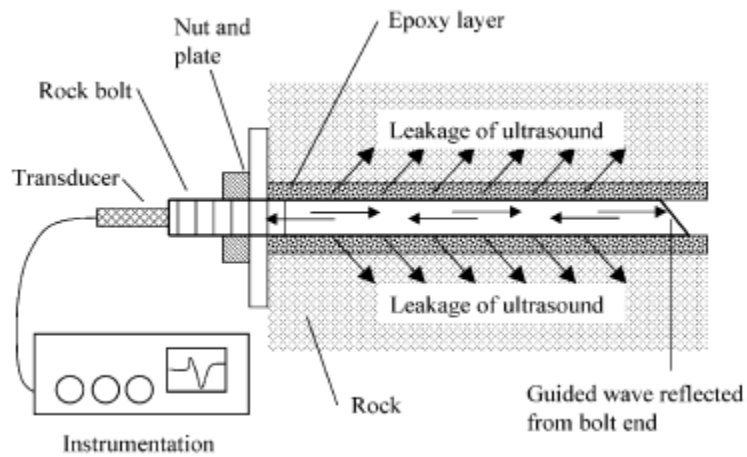
-För och nackdelar med metoden:

Förutom svårigheten att ersätta eventuellt ingjutna transducers har metoden inga nackdelar.

-Anmärkning:

Om man har tillgång till den fria änden av dragstaget innan det gjuts in kan man klistra fast en ultraljudtransducer på staget och dra ut en elektrisk förbindelse som är åtkomlig även sedan staget gjutits in. Då kan man göra upprepade mätningar på staget och så småningom få en tidsserie som visar om det har uppstått några förändringar. Genom att man har tillgång till en tidsserie är det lättare att verifiera att det inträffat en kritisk förändring, detta gäller i synnerhet om tidsserien är närmast kontinuerlig, så att dygns och årstidsvariationer kan beskrivas. Man talar då om *övervakning* snarare än *oförstörande provning*. Med flera års mätdata i serien får man en möjlighet att bestämma "normalvariansen" som funktion av årstiden och då är det möjligt att beskriva hur onormalt ett mätvärde är och avgöra om en åtgärd skall genomföras. Detta är mycket svårt att göra om man endast har ett enstaka mätvärde, som man får vid en konventionell insats med oförstörande provning. Ett mycket stort antal mätpunkter kan övervakas av ett ultraljudinstrument, genom att man liksom med TDR kan koppla en multiplexer till instrumentet. Multiplexern

kan koppla in olika transducers till instrumentet. Mätningarna kan göras hel-automatiska.



Figur 4-9 Illustration av hur en ultraljudstransducer kan anbringas på dragstagets fria ände [13].

5 Teoretiska metoder för tillstånds- och livslängdsbedömning

5.1 Allmänt

All vetenskap bygger på hypotes, modell och verifiering. I detta avsnitt behandlas kortfattat hypotes och modeller. Modellerna ska sedan verifieras mot mätningar av något slag, se kapitel 3.

Om modeller grundade på fysikaliska samband kan användas är det en fördel då flera samverkande faktorer kan tas med, modellen kan användas för andra förhållanden eller senare i tiden då den bygger på fysikaliska samband och inte kurvanpassning från ett enskilda experiment eller mätning.

5.2 Bergets fysikaliska egenskaper

5.2.1 Allmänt

Med bergets fysikaliska egenskaper menas här i första hand täthet mot transport av vatten och däri lösta ämnen eller syre som kan tänkas påverka förankringen.

5.2.2 Bergets täthet mot vattentransport

Berg är oftast ett relativt permeabelt medium avseende vattentransport. Vid en dammkonstruktion utsatt för skillnad i vattentryck mellan upp- och nedströmsidan kommer vatten att transporteras i bergets porsystem och framförallt i spricksystem.

Som all vattentransport i porösa material beror mängden transporterat vatten på tryckgradienten, av hur stora och genomgående flödeskanalerna är samt om flödeskanalerna är helt vattenfyllda eller bara till viss del fyllda.

Vid ett helt vattenfyllt material brukar man modellera transporten med den välkända Darcy's lag

$$q_v = k_v \cdot \Delta H / \Delta L \cdot A \quad (5-1)$$

där q_v = vattenflödet genom en tvärsektion mellan två betraktade punkter (m^2); k_v = permeabilitetskoefficient (m/s); ΔH = vattentrycksskillnaden (m); ΔL = längd på strömvägen (m); och A = tvärsnittsarean (m^2).

Om materialet, eller snarare flödeskanalerna, antas bara delvis fyllda kommer andra fysikaliska drivkrafter in i bilden, t.ex. kapillärsugning eller diffusion, vilka är svårare att modellera. Nedan avses i fortsättningen modellering av vattentransport enbart med antagande om vattenfyllda flödeskanaler/porsystem, d.v.s. med Darcy's lag.

Eftersom vattentransport förenklat uttryckt beror av flödeskanalens diameter upphöjt till tre eller fyra för flöde i spalt resp. flöde i rör, förstås att mängden

vatten huvudsakligen beror på sprickvidden/diametern hos eventuella genomgående spricksystem under dammen. Flödets beroende av tryckgradienten är enbart linjär.

5.2.3 Flöde av aggressiva ämnen

I detta sammanhang avses ämnen som kan påverka bergförankringens mekaniska egenskaper, läs bärförmåga. Sådana ämnen kan transporteras i helt eller delvis vattenfyllda sprickor. Ämnen kan vara exempelvis:

- Vatten självt genom sin förmåga att lösa upp och föra bort ämnen i injekterat bruk runt förankringen (urlakning). Se avsnitt 5.2.4.
- Lösta, aggressiva joner som t.ex. sulfatjoner. Kloridjoner som annars vanligtvis medtas som aggressiva joner i samband med cementmaterial är inte vanliga i dessa sammanhang under betongdammar. Se avsnitt 5.2.4.
- Syre som kan medföra stålkorrosion hos förankringen.

5.2.4 Urlakning av bruk eller betong runt förankringen

Runt förankringen i berg och i betongdammen ovanför finns injekterat cementbruk respektive betong. Vatten som når fram till bruket eller betongen närmast förankringen kan lösa upp material ingående i bruket och betongen. Ju "renare" vattnet är, d.v.s. ju mindre redan lösta salter det finns i vattnet, man brukar även prata om "mjukt vatten", desto större är vattnets förmåga att lösa ut material från bruket/betongen.

När vatten når fram till bruk/betong löses först de mest lösliga ämnena ut i materialets porlösning, som Na^+ och K^+ . De lösta ämnena måste sedan transporteras bort från platsen, genom diffusion, om vattnet är relativt stillastående eller genom konvektion, om vattnet strömmar igenom eller förbi ytan, eller en kombination av dessa. När ytan hos bruket/betongen blir urlakat på Na^+ och K^+ kan vattnet börja lösa upp det lite mer svårslösliga $\text{Ca}(\text{OH})_2$ som finns löst i porsystemet, eller tränga vidare och lösa upp mer Na^+ och K^+ längre in i bruket/betongen. Dessutom kan det ytterligare lite mer svårslösliga $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bundet i cementgelen börja lösas upp. Vad som löses först och hur mycket handlar om kemiska balanser beroende på hur lösliga ämnena är och hur nära till de befinner sig för det "aggressiva" vattnet. När väl vattnet har löst upp ämnen måste det leda ut de lösta jonerna från platsen (urlakning) för att ytterligare ämnen ska kunna lösas ut från bruket/betongen.

I en hydratiserad, ej urlakad betong ligger pH på ca 13,2 i brukets/betongens porlösning. När allt Na^+ och K^+ urlakats sjunker pH till ca 12,5 då $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i porvattnet börjar buffra. När $\text{Ca}(\text{OH})_2$ försvunnit ut från porlösningen sjunker pH i porvattnet. Hur snabbt beror på hur mycket "mjukt" vatten som kan tillföras per tidsenhet, ty $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i cementgelen är mer svårslöst. I stora sprickor med stort genomgående vattenflöde kan pH i utflödat vatten bli lågt, ty vattnet hinner inte diffundera in i sprickväggarna, lösa upp ny $\text{Ca}(\text{OH})_2$ och sedan leda ut det till sprickväggarna tillräckligt snabbt relativt vattenhastigheten genom sprickan.

I långt framskriden urlakning urlakas även andra, mer svårlösliga ämnen, såsom Fe, S, Mg, etc, vilka befinner sig i olika hydratiserade föreningar i bruket/betongen.

Verkan av urlakningen påverkar bergförankringens bärförmåga på huvudsakligen två sätt; genom att (i) bruket/betongen blir svagare runt stålet och därmed blir vidhäftningen svagare och därmed blir förankringen av stålet i berget respektive betongen svagare och genom att (ii) pH sjunker närmast stålet, vilket kan leda till stålkorrosion, om syre samtidigt finns närvarande.

Att bruket/betongens vidhäftning blir svagare har att göra med att när cementgelen blir urlakad på $\text{Ca}(\text{OH})_2$ så ökar porositeten varvid E-modul och hållfasthet, framförallt drag/sprickhållfastheten, sjunker.

För att kunna uppskatta hur mycket bärförmågan hos förankringen sjunker eller hur mycket pH runt stålet sjunker kan olika, mer eller mindre avancerade, modeller användas.

En konceptuell modell (tankemodell) kan vara enligt ovan, d.v.s. en närvaro av vatten runt förankringen löser upp och leder bort viktiga föreningar i bruket/betongen, varvid bärförmåga och ytskydd för stålet (pH) försämras.

För att mer säkert uppskatta tillstånd och livslängd hos en förankring måste numeriska modeller ställas upp och beräknas, samt verifieras mot mätningar/experiment. Ju mer fysikaliskt "riktig" modellen är, t.ex. med olika kemiska och fysikaliska differentialekvationer, desto mer giltig och användbar modell kan man troligen få. Ett sätt kan vara att med att FEM-formulera sådana differentialekvationer och lösa dem i ett, två eller tredimensionellt system. Då det oftast rör sig om beräkningstunga ekvationer och över lång tid bör man sträva efter en förenkling nedåt i dimensionerna, helst till 1D, t.ex. med stömrör från uppströms- till nedströmssidan och med passage förbi aktuell förankring [23].

5.2.5 Aggressiva joner

Om aggressiva joner, såsom t.ex. sulfatjoner, når fram till förankringen kan dels bruket/betongen tänkas få skador, eller stålets ytskydd mot korrosion försämras. Troligen kan samma typ av modellering som beskrivits i avsnitt 5.2.4 för urlakning användas, då det rör sig om transportekvationer och kemiska jämviktsekvationer.

5.2.6 Syretransport

Med transport av syre menas här transport av syre fram till aktuellt förankringsstål, varvid stålkorrosion ev. kan starta om stålets ytskydd har skadats, t.ex. genom en sänkning av pH orsakat av urlakning, se avsnitt 5.2.4.

Dock är närvaro av syre och urlakning av vatten samtidigt i motsatsförhållande till varandra. Vid stor urlakning krävs mycket vattennärvaro, varvid syre får svårt att nå fram till förankringen. Syret måste i såna fall lösa sig i vattnet och ta sig fram till förankringen. Vid omättat por/spricksystem i berget eller betongen kan syre lättare ta sig fram till förankringen, men då är å andra sidan urlakningen svag eller ingen.

Mest kritiska förhållandet kan tänkas vara om urlakningen av bruket/betongen uppströms åt är stort, samtidigt som det finns sprickor nedströms från, fram till förankringen, så att det kan ske en syretransport.

5.2.7 Slutsats

- Modellering av flöde av olika aggressiva ämnen i mer eller mindre vattenfyllt berg eller betong är avancerad modellering med många olika balansekvationer och kemiska jämvikter. Det finns exempel från litteraturen, men modelleringen bör, för att vara praktiskt genomförbar, förenklas så långt det är möjligt.
- Ska ett mer globalt vattenflöde modelleras, t.ex. i syfte att beräkna porvattentryck i berget eller som tryck mot betongdammen, kan lämpligen Darcy's lag och ett FEM-program användas.
- Ska en mer lokal inverkan av vattenflödet analyseras, t.ex. avseende urlakning längs en fog, kan lämpligen en förenklad 1-dimensionell modell användas av Darcy's lag, längs ett strömrör.

5.3 Bergets mekaniska egenskaper

Bergets mekaniska egenskaper inverkar på en bergförankrad betongdamm t.ex. genom:

- Att dammen globalt kan glida eller stjälpas p.g.a. svagheter i zonen mellan dammen och berget eller p.g.a. svagheter i bergmassan.
- Att bergförankringarna lokalt erhåller en mothållande effekt från en viss omgivande volym inklusive ev. mothållande krafter mellan denna volym och omgivande berg.

Bergets mekaniska egenskaper är ofta svåra att både bedöma och kvantifiera. Dels är berget ofta dolt under den betraktade konstruktionen och dels har ofta berget olika egenskaper i olika delar och i olika riktningar p.g.a. sprickor och av olika material eller bergarter, d.v.s. det är ej homogent och ej isotropiskt.

Finns sammanhängande spricksystem under en damm kan dammen i värsta fall tänkas glida längs ett sprickplan, om påskjutande laster är större än mothållande bärförmåga.

Allmänt sett kan ett globalt glidbrott under en betongdamm utvecklas beroende på hur och var brottet inträffar. Brottet kan ske mellan undersidan av betongen och berget eller brottet kan ske i berggrunden, en bit under dammen. Följande typfall av glidbrott kan tänkas [24]:

- A. Brott i kontaktytan mellan betong och berg.
- B. Brott längs sprickplan i berget.
- C. Brott i bergmassan.

Brott sker i den svagaste delen av ovanstående.

Fall A kan sin tur delas upp i två alternativ:

- A1 Brott i kontaktytan, utan vidhäftning (utan kohesion)

A2 Brott i kontaktytan, med vidhäftning (med kohesion)

Observera att ett globalt brott enligt A-C berör brott i kontaktzonen, i bergsprickor eller i bergmassan och berör egentligen inte de aktuella bergförankringarna utan det globala brottet enligt Figur 2-1 och Figur 2-2.

Den maximala bärförmågan eller brotthållfastheten, T , i kontaktytan mellan betong och berg, fall A, kan beräknas med det allmänna uttrycket [24]:

$$T = c \cdot A_c + N' \cdot R \cdot \tan \phi_i \quad (5-2)$$

"Där T = Skjuvkraft som maximalt kan mobiliseras i brottplanets riktning (kN) c = Kohesion (kPa) A_c = Tryckt area med påräkningsbar kohesion (m^2) N' = Normalkraften vinkelrätt brottplanet reducerad för upptryck (kN) R = Reduktionsfaktor som anger andelen av hela normalkraften som faller på delen A_c ϕ_i = Inre friktionsvinkel för vidhäftningshållfasthet ($^\circ$)".

Enligt RIDAS ska inte någon mothållande kohesionskraft medräknas och i så fall bortfaller första termen i ekvationen.

Om kohesionskraft ska medräknas avser denna alltså kohesionen mellan betong och berg och kan därför naturligtvis påverkas av en ev. urlakning på samma sätt som diskuterats i avsnitt 5.2.4, men då det inte rör sig direkt om funktionen hos bergförankringen, så behandlas inte denna vidare här.

Avseende ett globalt glidbrott bidrar bergförankringen med ett mothållande tillskott till ekvationen (5-2), se avsnitt 2.1.

Avseende ett globalt brott längs sprickplan i berget eller i bergmassan kan bergförankringar ev. bidra till en mothållande effekt om dessa korsar sprickplanen eller håller ihop bergmassan, men dessa fall diskuteras ej vidare här.

För att kunna uppskatta bidragande mothållande kraft av berget till en bergförankrings bärförmåga måste en uppskattning göras av medverkande bergvolym och mothållande krafter i ytan mellan den medverkande volymen och omgivande volym. Modeller för detta kan t.ex. vara:

- Kon av medverkande bergvolym antas, t.ex. enligt Figur 2-4. Utan mothållande krafter i konens yta mot omgivande berg.
- Prisma av medverkande bergvolym antas, t.ex. $1 \times 1 \text{ m}^2$ i basarea multiplicerat med höjden på prismet. Med en mothållande friktionskraft i prismats yta mot omgivande berg.
- FEM-beräkning med en brottmekanisk bergmodell där medverkande tyngd och krafter faller ut från beräkningen.

Slutsatser avseende globalt brott i berget under dammen:

- Ett globalt brott kan antas ske i fogen mellan betongen och berget, i ev. sprickplan i berget eller i bergmassan under dammen.
- En bergförankring bidrar med en mothållande kraft i den globala stabiliteten.

Slutsatser avseende lokalt brott vid resp. bergförankring:

- En enkel modell för att uppskatta medverkande kraft från berget till en bergförankrings bärförmåga kan röra sig om att grovt anta en viss medverkande bergvolym och anta en viss eventuell medverkande

mothållande kraft mellan bergvolymen och omgivande berg, exempel finns i litteraturen.

- Man skulle kunna modellera berget med en brottmekanisk skademodell där den medverkande kraften från berget till bergförankringen erhålls som resultat.

5.4 Brukets fysikaliska och mekaniska egenskaper

Avseende brukets fysikaliska egenskaper kan sägas att de beror dels på hur brukets egenskaper blev vid injekteringen och dels hur egenskaperna förändrar sig med tiden. Förändringen med tiden rör sig om i stort sett samma resonemang som fördes i avsnitt 5.2, d.v.s. att aggressiva ämnen kan förändra, oftast försämrar, brukets egenskaper med tiden.

Vatten som förmår tränga fram till bruket kan i sig självt urlaka bruket eller vattnet kan föra med sig aggressiva ämnen och syre.

Beroende på hur långt in under dammen förankringen sitter samt ev. sprickor/glipor fram till bruket kan transporten av vatten och ämnen ske olika snabbt. Om det finns en större glipa eller spricka fram till förankringen och dess omgivande bruk kan t.ex. urlakningen blir relativt kraftig lokalt i bruket. Brukets mekaniska egenskaper följer resonemanget ovan, d.v.s. dels hur de blev vid injekterings utförande och dels hur de förändrar sig med tiden. Om en urlakning av bruket kan ske med tiden kommer porositeten att öka hos bruket och de mekaniska egenskaperna att försämrar. För exempel på modeller bör kunna användas i princip samma modeller som rekommenderas i avsnitt 5.6.

Slutsatser:

- För modellering av brukets fysikaliska egenskaper såsom vattenpermeabilitet och porositet bör kunna användas en-, två- eller tredimensionella transportekvationer som beskriver sambandet mellan transport av vatten och aggressiva joner. 1D-modeller är enklast och troliken tillfyllest i de flesta situationer.
- För modellering av brukets mekaniska egenskapers förändring med tiden avseende urlakning bör kunna användas modeller som baseras på porositeten hos bruket, se t.ex. [23].

5.5 Stålets mekaniska egenskaper

Stålets mekaniska egenskaper beror i detta sammanhang framförallt på ev. stålkorrosion. Stålkorrosion kan tänkas uppträda om ytskyddet av stålet blir dåligt och om syre finns närvarande där stålet befinner sig. Ytskyddet kan försämrar om bruket inte omsluter stålet ordentligt vid injekterings utförande eller om bruket blir urlakat med tiden.

Modeller för att uppskatta urlakning och därmed ett sjunkande pH mot stålet, samt tillförsel av syre; se avsnitt 5.2.

5.6 Betongens fysikaliska och mekaniska egenskaper

Avseende betongens fysikaliska och mekaniska egenskaper kan sägas att de beror dels på hur betongens egenskaper blev vid gjutningen och dels hur egenskaperna förändrar sig med tiden. Förändringen med tiden rör sig om i stort sett samma resonemang som fördes i avsnitt 5.4, d.v.s. att aggressiva ämnen kan förändra, oftast försämma, betongens egenskaper med tiden.

5.7 Betongdammens totala bärförmåga

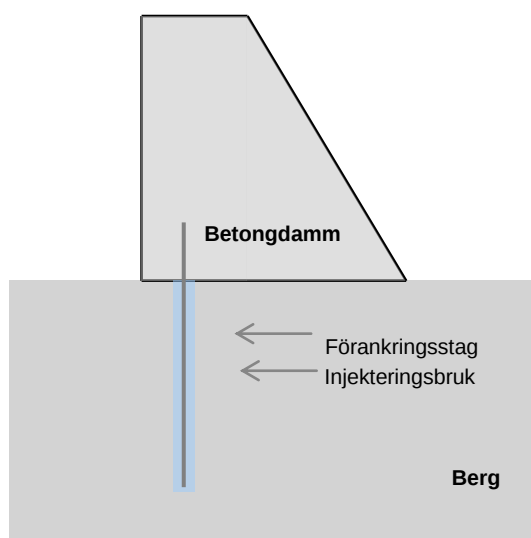
Som redan nämnts i kapitel 2 beror dammens stabilitet av mothållande och pådrivande krafter och moment och där bergförankringen ingår som en del. Bergförankringens bidrag antas här som en mothållande kraft där denna kraft antas vara det minsta av:

- Medverkande bergkraft av bergtyngd och friktionskrafter
- Samverkan berg-bruk
- Samverkan bruk-stål
- Stålets bärförmåga
- Samverkan stål-betong

Bergförankringens mothållande kraft sätts in och används på lämpligt sätt i villkoren för stjälpning eller glidning, t.ex. enligt princip i [9] avsnitt 3.11.

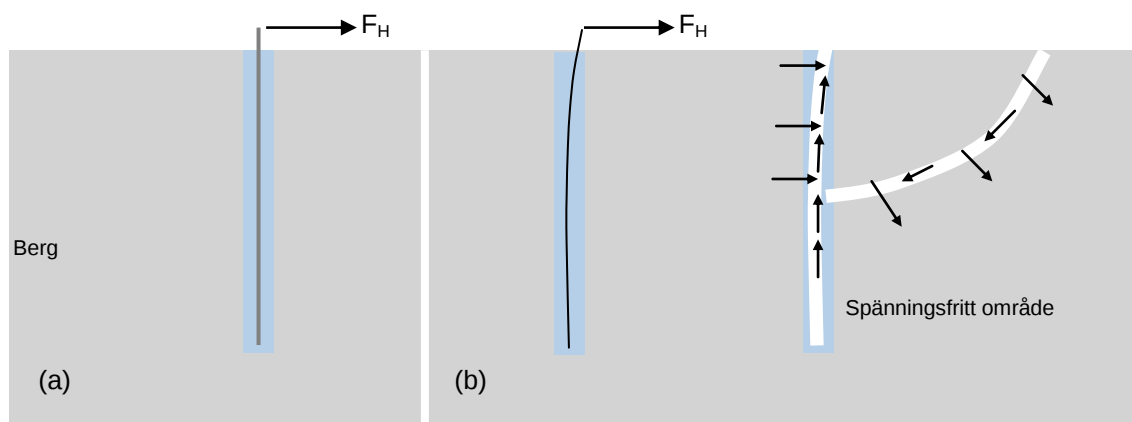
6 Brottmoder och deformation

Figur 6-1 visar schematisk bild av en damm som förankrats med ett stag mot berget. Staget är placerat i ett borrarat hål och injekterats med bruk. Staget skall motverka lyftning av dammens häl respektive glidning av dammen, se även avsnitt 2.



Figur 6-1 Schematisk bild av en damm förankrad mot berg.

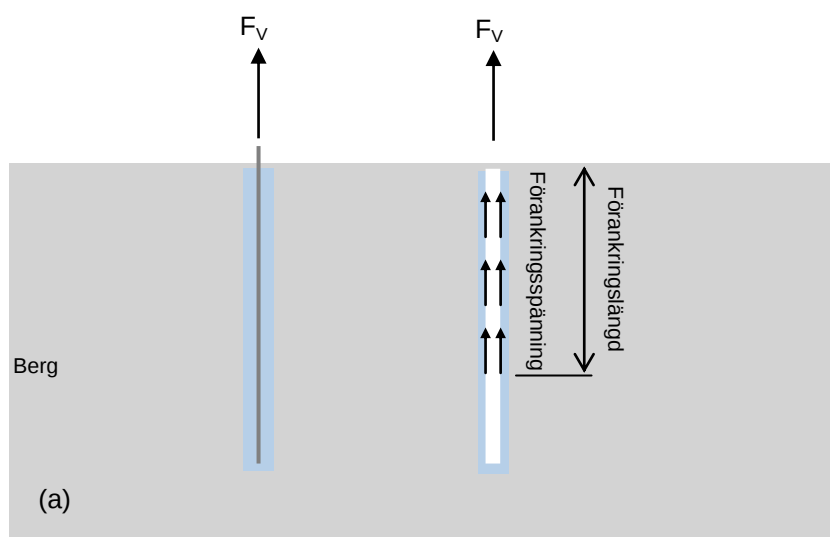
Figur 6-2 och Figur 6-3 visar staget förankrat i ett berg. Härefter betraktas enbart den del av staget som är förankrat i berget. Den del av staget som är ingjuten i betong kan behandlas i princip på samma sätt, kanske något enklare.



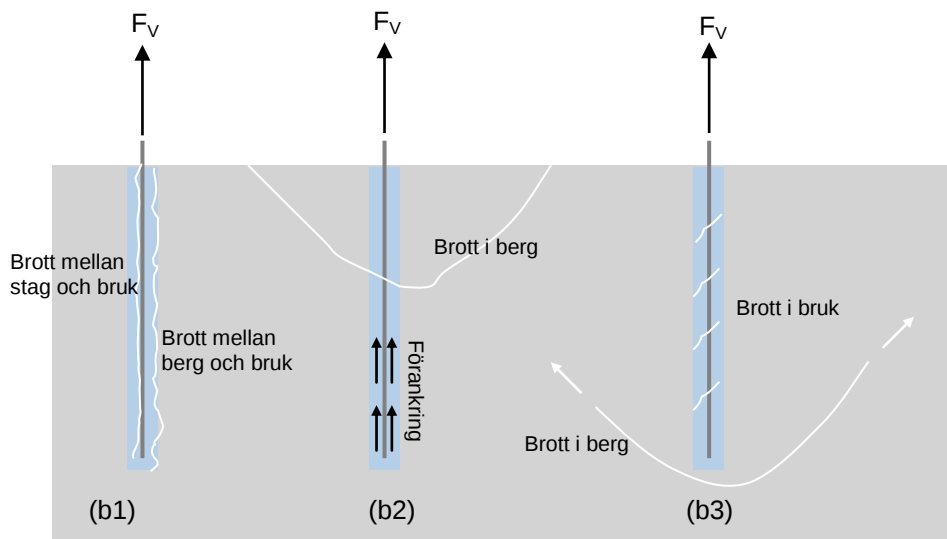
Figur 6-2 Förankringsstag utsatt för horisontell kraft.

Som framgår av Figur 6-2 (a) utsätts staget för en horisontell kraft (F_H). Vid ideala förhållanden råder perfekt vidhäftning mellan bruk och berg och mellan bruk och stag. Berget är tillräckligt starkt och spricker inte. Brottet sker genom skärbrott (skjuvbrott) i stag vid toppen av borrhållet. Ett annat scenario är att staget trycks mot bruket, som så småningom spricker. Detta leder till sämre vidhäftning mellan stag och bruk. Stagets tryck mot bruket samtidigt som det utsätter bruket för dragspänningar. Figur 6-2 (b) visar de spänningar som staget utövar på bruket. Som framgår av figuren förekommer tryckspänningar inom ett begränsat område. Nedanför den tryckta delen förekommer enbart förankringsspänningar. Förankringsspänningar förekommer inom den längd som behövs för förankringen. Under ideala förhållanden, d.v.s. välgenomförd injektering samt starkt bruk och berg, är en del av staget spänningsfri. Figuren visar även spänningar som kan uppkomma i den övre delen av berget i nära anslutning till bruket. Om berget är starkt, d.v.s. att det inte spricker längs med den linje som visas i figuren, kan god förankring uppnås ändå.

Figur 6-3 (a) visar ett stag utsatt för vertikal kraft (F_V). Under perfekta förhållanden utvecklas förankringsspänning mellan stag och bruk över den längd som behövs för förankring. Under sämre förhållanden uppstår glidning mellan stag och bruk, vidhäftningsbrott mellan bruk och berg, sprickbildning i bruk eller i berg, mm. Några typer av brott framgår av Figur 6-3 (b).



(a) – Förankringsspänning är den spänning som staget utövar på bruket. Förankringslängd är den sträcka över vilken uppstår spänning mellan stag och bruk.

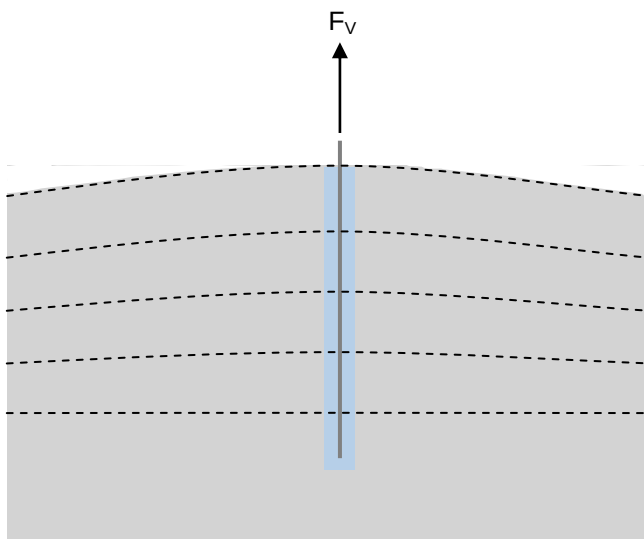


(b) – Olika typer av brott.

Figur 6-3 Förankringsstag utsatt för vertikal kraft.

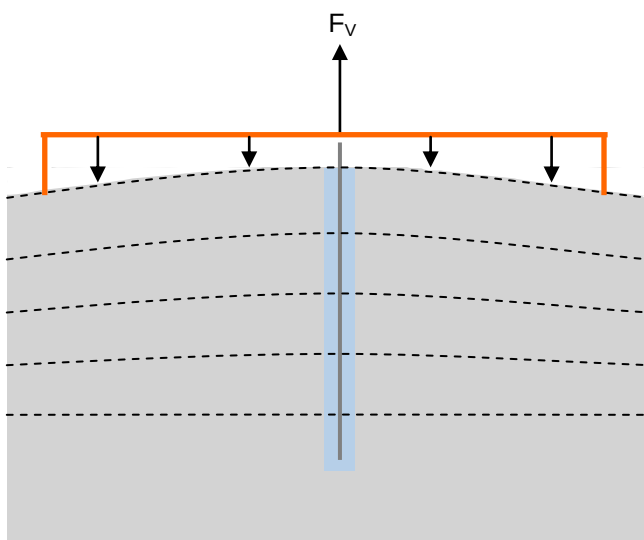
Figur 6-4 visar ett stag utsatt för dragning. De streckade linjerna visar deformationerna eller förskjutningarna uppåt. Vid perfekt samverkan och under elastiska förhållanden följer bergets och brukets deformationer stagets. Om staget blir avlastat går deformationerna tillbaka. Bergets, brukets och stagets deformationer är då proportionella mot belastningen (förutsatt att berget är elastiskt), men de har olika proportionalitetsfaktorer. Om staget börjar glida (t.ex. om vidhäftningen börjar släppa, bruket får sprickor eller släpper från berget) kan följande hända:

- 1) Stagets belastning ökar vid fortsatt dragning. Förutsatt att staget inte uppnår sin flytgräns så ökar deformationerna vid lastens angreppspunkt. Bergets deformation ökar också men med förändrad deformationsfördelning. Deformation vid lastens angreppspunkt är inte proportionell mot lasten, men det kan vara i berget (även på bergets yta) om berget inte spricker och beter sig elastiskt. Det förekommer störningar men de avtar en bit från borrhålet.
- 2) Stagets belastning minskar vid fortsatt dragning. Detta indikerar någon typ av brott:
 - a) staget har uppnått maximum last – berget blir avlastat och deformationerna minskar
 - b) förankringsbrott mellan stag och bruk eller mellan bruk och berg – berget blir avlastat och deformationerna i berget minskar
 - c) brott i bruk – berget blir avlastat och deformationerna i berget minskar
 - d) brott i berg



Figur 6-4 Deformationer orsakade av vertikal belastning.

Figur 6-5 visar en mätanordning för bestämning av last och deformationer för verifiering av beräkningsmodellen. Deformationerna kan mätas med vanliga givare eller med beröringsfria. De kan kompletteras med olika OFP metoder.



Figur 6-5 Bestämning av deformationer.

Man kan borra ut delar eller hela längder både före och efter provning för att studera vidhäftning, urlakning, korrosion, mm.

6.1 Slutsats

För närvarande finns ingen kunskap om de olika brottmoderna. Det finns inget underlag för att kunna identifiera de sannolika brottmoderna och bedöma deras frekvens. En systematisk undersökning behövs inom detta område. Resultatet kan ligga till grund för att ta fram säkerhetsfaktorer eller partiellkoefficienter för dimensionering av förankringar.

Med hjälp av FEM kan spännings- och deformationsfördelningen uppskattas. Man kan utföra både linjära och icke linjära beräkningar. Man kan med hjälp av beräkningsresultaten utforma dragningsförsök för att kalibrera modellen och bestämma parametrarna. Mätresultaten ger även information om hela systemets bärförmåga och styvhet som är användbara för dammsäkerhetsberäkningar om man utför lämpliga antal provningar.

För att utföra arbetet på ett systematiskt sätt krävs att olika anläggningsägare samverkar. När man river/renoverar dammar, ledmurar eller annan konstruktion som har förankring skall möjlighet ges för provningar. Man bör, dock, ta fram ett genomgående och detaljerad anvisning för hur provningarna skall utföras och de parametrar som skall bestämmas pekas ut. Därför bör arbetet föregås med ett teoretiskt arbete där man identifierar de styrande parametrar och avgör deras mätbarhet.

7 Diskussion

En dominerande orsak till förändringar hos en bergförankrings tillstånd/bärförmåga är verkningar av olika transporter, t.ex. transport av vatten och däri lösta aggressiva ämnen.

Bergförankringar sitter oftast dolda för betraktaren och tillståndet/bärförmågan oftast okänt. Tillståndet/bärförmågan kan uppskattas med hjälp av modellering med verifiering mot mätningar eller experiment. Sällan kan dock mätningar göras i en aktuell, verklig konstruktion.

Mätningar av verkliga förankringar kan göras för andra konstruktioner som ändå ska förstöras (t.ex. Hotagen [1]). Är förhållandena som förankringen levat under någorlunda kända och om man har en fysikalisk avancerad modell, kan det tänkas att tillståndet hos förankringar i andra konstruktioner kan uppskattas. Om antalet mätningar ökar kan modellen förfinas och säkrare uttalande göras.

För att studera förankringars verkningssätt och få underlag till modellering kan experiment utföras, t.ex. att förankringar gjuts in och borrar fast i berg i en så känd miljö som möjligt.

Då tillståndet/bärförmågan hos en bergförankring beror av en mängd olika fysikaliska orsaker och olika geometriska förhållanden, bör använda modeller vara så fysikaliskt nyanserade som möjligt, t.ex. ett FEM-program med multifysik.

Huvudingredienserna i en modell bör vara olika transportekvationer, t.ex. transport av vatten och däri lösta ämnen. Transporterna av vatten och aggressiva ämnen åstadkommer en förändring, t.ex. en förgrovning av por- eller spricksystem, vilket med mer enkla modeller bör kunna ge en förändring av uppskattad bärförmåga hos förankringen.

I dagsläget uppenbarar sig frågor kring huruvida det är möjligt att mäta eller bedöma tillståndet samt livslängd hos befintliga förankringsstag – i syfte att stödja stabilitetsberäkningar. Denna rapport presenterar närliggande eller angränsande arbeten inom frågan, samt förslag på möjliga mätmetoder. Uppenbart är att det är komplicerat pga. brist av åtkoms i befintliga dammar.

Detta arbete visar att indirekta mätmetoder i kombination med teoretisk modellering är en möjlig väg som kan mynna ut i approximativa beräkningar/analys. Dessa kan vara av stor hjälp, då stagens förankring ej beaktas pga. av dessa ej är inspekterbara.

Gällande nyproduktion, finns större möjlighet att installera utrustning som kan övervaka stagens funktion och tillstånd. Dock anses att det krävs modellering av krafter som råder och hur dessa inverkar på en dam samt dess förankring. Syftet med modelleringen är att kunna utröna vad och vart mätningar skall utföras för att erhålla bästa information. Mätningar på instrumenterade nyinstallerade stag, i kombination med övervakning och teoretiska beräkningar kan ge ett värdefullt underlag även för befintliga stag. Resultaten i kombi-

nation med mätningar utförda på befintliga stag kan ge bättre underlag för tillståndsbedömning av de befintliga. Därför, är det av relevans att erhålla ytterligare information och data från befintliga dammar, ev. när rivning eller ombyggnation sker, för att på så sätt bygga upp och en samlad databas över materiel- och skadedata/-statistik.

Om dragstag ska kunna medräknas i stabilitetsberäkningar, bör man starta med systematisk insamling av erfarenheter vad gäller bärförmåga, brottmoder och nedbrytningsmekanismer i verkliga installationer. Det kan eventuellt visa att dragstagen oftast är av god kvalitet, vilket är en värdefull slutsats som banar vägen för tillgodoräknandet av dragstegen vid stabilitetsberäkningar. Datainsamlingen ger även ett statistiskt underlag för kalibrering av modeller och materialegenskaper.

8 Slutsatser

Bortsett från vissa undantagsfall, visar denna rapport att det inte är möjligt att, på ett direkt och entydigt sätt, bedöma ett redan installerat dragstags tillstånd och bärförmåga. Undantagsfallen är:

- Om dragstaget är åtkomligt kan man belasta och avgöra dess bärförmåga. Detta är naturligtvis ett förstörande provning. Man kan även belasta staget till en förutbestämd nivå. Om staget klarar belastningen, utan större kvarvarande deformationer, efter att det har avlastats, kan man likställa lasten med stagets bärförmåga.
- Om dragstaget är åtkomligt och dess längd är känd kan man via mätmetoder avgöra om det är avbrutet eller ej. Man kan även avgöra om det finns större defekter som hållrum, korrosion, dålig vidhäftning mellan stag och bruk / bruk och berg. Den här typen av defekt kan upptäckas om processen har hunnit långt.

Arbetet visar, dock, att det finns olika möjligheter att kunna följa ett nyinstallerat stags egenskaper, om detta förses med rätt utrustning. Arbetet visar att den kunskap som på detta sätt erhålls, även kan användas för tillståndsbedömning av befintliga stag och utveckling av bättre analysmodeller.

Vidare, visar arbetet att det för utveckling av bättre analysmodeller är nödvändigt att kombinera avancerade beräkningsmodeller med olika provningar och mätningar, både i laboratoriet och i fält. Beräkningar kan användas för bestämning av typ av mätningar, placering och antalet mätpunkter, m.m. Beräkningar kan även användas för att avgöra olika parametrars inflytande på mätresultaten.

9 Förslag till fortsatt arbete

Denna rapport visar olika möjligheter för bedömning av ett dragstags tillstånd. Med tillstånd menas här en helhetsbild som inkluderar bärförmåga samt mekaniska, fysikaliska och kemiska förändringar hos de delar som tillsammans bygger upp det system som möjliggör för staget att uppfylla de krav som ställs. Som beskrevs tidigare i rapporten, saknas statistiskt underlag när det gäller bärförmåga, brottmoder, nedbrytningsmekanismer m.m.

Om dragstag ska kunna medräknas i stabilitetsberäkningar, bör man starta med systematisk insamling av erfarenheter vad gäller bärförmåga, brottmoder och nedbrytningsmekanismer i verkliga installationer. Det kräver att de tillfällen som ges att samla på sig praktisk erfarenhet tas tillvara. Arbetet bör inkludera provning av ingjutna stag (när dessa ev. friläggs) och instrumentering av nya stag samt eventuellt provning. Arbetet bör föregås av en noggrann planering och presentation av de parametrar som bör bestämmas.

Ett viktigt verktyg för planering av provningar, val av parametrar samt ökad förståelse, är modellering av staget och dess samverkan med den omgivande miljön. Modellerna ska minst beskriva systemets deformationer, uppsprickning och eventuella brottmod. Vidare, skall modellerna på ett förenklat sätt kunna beskriva de nedbrytningsprocesser som påverkar systemet. Exempel på frågeställningar som bör beaktas visas nedan:

1. Uppställande av relevanta transportekvationer (diff.ekvationer).
2. Enkla modeller som transformerar transporternas verkningar till förändringar hos förankringens tillstånd/bärförmåga, t.ex. vattenflöde $\Rightarrow$ urlakning $\Rightarrow$ förgrovning av porsystem $\Rightarrow$ lägre hållfasthet/E-modul $\Rightarrow$ lägre total bärförmåga hos förankringen.
3. Ställa upp de i modellerna nödvändiga beräkningsvariablerna.
4. Föreslå relevanta mätningar/experiment för att kunna uppskatta värden på dessa variabler, t.ex. spricksystem i berg, korrosionsgrad i stål, etc.
5. När (om?) modellerna blir giltiga, efter ovanstående övningar, kan förankringens bärförmåga uppskattas över tiden (livslängd) och för förankringar i andra dammar samt andra driftsituationer.

10 Referenser

- [1] Larsson, C. (2008). Utredning och provtagning av förankringsstag i Hotagens regleringsdamm – Examensarbete. Elforsk rapport 09:73.
- [2] Grouted Post-Tensioned Rock Anchor Assessment, Project: T122700-0230 (ongoing), CEATI International, Inc. (CEATI) - Dam Safety Interest Group (DSIG).
- [3] Non-Destructive Testing of Bar or Cable Anchors Embedded in Concrete Dams, Project: T052700-0208 (2012), CEATI International, Inc. (CEATI) - Dam Safety Interest Group (DSIG).
- [4] Sederholm B & Reuterswärd: Korrosionsprovning av olika typer av bergbultar. BeFo Rapport nr 126, 2013, Stockholm.
- [5] Håkansson, W. (2013). Kraftverkstunnlars beständighet – En studie om åldringsfenomen och nedbrytningsprocesser. Examensarbete, Väg och Vatten – Teknisk geologi, LTH, Lund. ISRN:LUTVDG/TVTG-5131/1-100/2013.
- [6] RIDAS TA (2011), "RIDAS, Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet, avsnitt 7.3, Betongdammar tillämpningsvägledning", Svensk Energi, 2011-12-15.
- [7] Bygg G (1984), "Handboken Bygg, Geoteknik", LiberFörslag, 1984, Stockholm.
- [8] SS-EN 1537:1999, "Utförande av geokonstruktioner – Förankringar", BST, 2000-03-31.
- [9] Boverkets handbok om betongkonstruktioner, BBK 04.
- [10] Hillerborg A., Modéer M., Peterson P.E., (1976), "Analysis of crack propagation and crack growth in concrete by mean of fracture mechanics and finite elements", Cement and Concrete Research, 6:773-782, 1976.
- [11] Tuuti & Byfors. "Betonghandboken – Material - xx", Svenskbyggtjänst, andra utgåvan, kapitel xx, Stockholm 199
- [12] Knappe, Peder & et al. Boltometerprovning av ingjutna bergbultar. Vattenfall Vattenkraft Stockholm 1997.
- [13] BEARD, M.,D. and LOWE, M.,J.,S., "Non-destructive testing of rock bolts using guided ultrasonic waves", Int. Journ. of Rock Mechanics & Mining Sciences 40 (2003) pp 527-536.
- [14] BERNSTONE, C., "Automated performance monitoring of concrete dams", Doktorsavhandling LTH 2006, ISRN LUTVDG/TVTG—1020—SE.
- [15] Leeming, M, Lane, J.S and Wade, P.J Post-tensioned bridge investigation – The way forward, Construction/Repair, s 193-197
- [16] Anon, P, Inspection of prestressing cables in bridges. Indian Concrete Journal, February 1987, Vol 61, No 2, s 31-33.

- [17] Bernstone C, Utvärdering av befintliga metoder för oförstörande provning av betong i kraftanläggningar. Elforsk Rapport 99:45, 1999.
- [18] http://www.enviroscan.com/html/seismic_refraction_versus_refl.html
- [19] <http://www.structuremag.org/article.aspx?articleID=994>
- [20] LEE, J., S. M. FL. "Rock bolt integrity evaluation in tunneling using ultrasonic NDT techniques", Underground Space – the 4th Dimension of Metropolises – Barták, Hrdina, Romancov & Zlámál (eds) © 2007 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-40807-3.
- [21] ZOU, D., H., S., CHENG, J., YUE, R. and SUN X., "Grout quality and its impact on guided ultrasonic waves in grouted rock bolts", Journ. of Appl. Geophys. 72 (2010) pp 102-106.
- [22] Nyberg Johnny. Reklamblad om LC Probe. 3C Corrosion Control Company.
- [23] Ekström, T., "Leaching of Concrete – The leaching process and its effects", Doktorsavhandling, Lunds Tekniska Högskola avdelningen för byggnadsmaterial, Rapport TVBM-1020, Lund 2003.
- [24] Gustafsson A., Johansson F., Rytters K., Stille H. (2008), "Betongdammars glidstabilitet – Förslag på nya riktlinjer", Elforskrapport 08:59, 2008-02-20.
- [25] <http://www.cosasco.com/index.php>

ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS - ELFORSK - AB

Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 25 30, Telefax: 08-677 25 35
www.elforsk.se