

MODELLFORSØK OG NUMERISK SIMULERING AV OVERBELASTNING AV FORANKRINGSSTAG I FRIKSJONS- OG LAVKOHEATIVE MATERIALER

Laboratory investigations on the mode of failure in frictional and low-cohesive materials under the load of a ground anchor

Hanna Margrete Høgset, Rambøll AS
Are Håvard Høien, Statens vegvesen
Charlie Chunlin Li, NTNU

SAMMENDRAG

En studie av bruddforløp i friksjons- og lavkoheative materialer som er belastet av et forankringsstag, simulert gjennom flere småskala modellforsøk og 2D numerisk simulering. Testapparatet er designet for å kunne visuelt studere hvordan brudd i materialene utvikler seg i sammenheng med lasten som påføres forankringsstaget. De ulike prøvene viser felles last-deforimasjon-oppførsel, som kan karakteriseres i fire faser. Fasene korresponderer med synlig utvikling av et trekantformet bruddlegeme i materialet. Resultatene har vist at materialets motstand mot brudd betydelig overgår vekten av det definerte bruddlegemet. Både de fysiske modellforsøkene og de numeriske simuleringene antyder at motstanden kan forklares av en mobilisering av skjærstyrken i testmaterialet.

SUMMARY

A study of failure progression in frictional and low-cohesive materials loaded by an anchoring rod, simulated through several small-scale model tests and 2D numerical simulation. The test apparatus is designed to be allow for visual studies of how failure in the materials develops in connection with the load applied to the anchoring rod. The different tests show a common load-deformation behaviour, which can be characterized in four phases. The phases correspond to the visible development of a triangular fracture body in the material. The results show that the material's resistance to anchor pull-out significantly exceeds the weight of the defined pull-out body. Both the physical model tests and the numerical simulations suggest that the resistance can be explained by a mobilization of the shear strength in the test material.

1 Introduksjon

Forankringsstag brukes til å stabilisere skråninger, støttemurer og stor infrastruktur som bygningsfundamenter, vindturbiner, betongdammer og brotårn. Det er viktig å sikre at stagene er riktig dimensjonert, da brudd i staget kan føre til strukturelle skader og potensielt store økonomiske eller samfunnsmessige konsekvenser. Stag som er forankret i berg eller løsmasser overfører en strekkbelastning til massene i grunnen. Prinsippene bak forankringsdimensjonering er primært basert på fire bruddmekanismer (se også Fig. 1):

- A) brudd i selve staget
- B) brudd i grensesnittet mellom stag og mørtel
- C) brudd i grensesnittet mellom mørtel og bergmassen
- D) brudd og uttrekk av et kjegleformet legeme av berg-/løsmasse

Bruddmekanismene A) og B) er grundig studert og godt kjent. På den andre siden er det stor usikkerhet knyttet til mekanismene C) og D), da det i dag er begrenset kunnskap om hvordan brudd oppstår og utvikler seg i berget/løsmassene, samt i grensesnittet mellom berg og mørtel ved overbelastning av stag. Denne artikkelen tar for seg bruddmekanisme D) og undersøker bruddforløpet i friksjons- og lavkoheative materialer under belastningen av et stag.

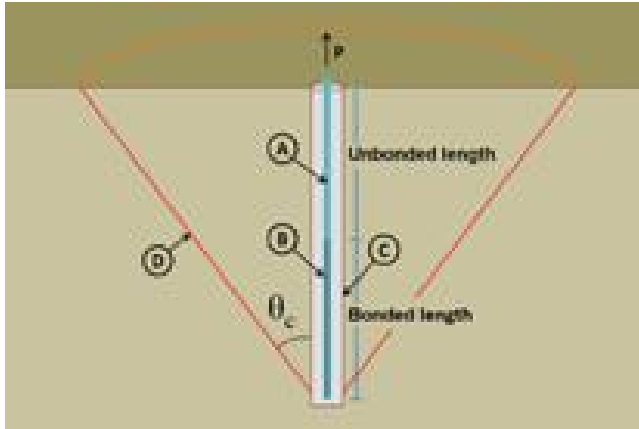


Fig. 1 Bruddmodus: (A) brudd i stålet; (B) grensesnitt stag og mørtel; (C) grensesnitt mørtel og berg; og (D) brudd i bergmassen

Forutsatt at grensesnittet mellom mørtel og bergart forblir intakt, eksisterer det flere metoder for å beregne bergmassens evne til å motstå uttrekk av en forankring i en isotrop bergart. Alle metodene forutsetter at et definert bergmasselegeme, med en enkel geometrisk form av en omvendt kjegle, trekkes opp fra bakken av den aksiale kraften som påføres staget. Hovedtilnærmingene for å analysere legemets motstand mot oppløft er gjennom: (1) bergmassens vekt eller (2) kjegleoverflatens skjærstyrke (Ongstad and Bergh-Christensen 2010).

Den første tilnærmingen, at uttrekk kun motvirkes av vekten til kjeglemassen av berg-/løsmasse, er den mest konservative metoden for å estimere motstanden mot uttrekk. Her forutsettes det at et kjegleformet legeme er fullstendig løsnet fra det omgivende materialet slik at overflatene ikke har noen skjærstyrke, og derved ikke genererer noe overflatefriksjon. Disse forutsetningene ser bort fra at materialet sannsynligvis har skjær- og/eller strekkfasthet som må overskrides for at uttrekk skal være mulig.

Den andre tilnærmingen forutsetter også brudd i et kjeglelegeme, men antar at skjærstyrken, strekkstyrken eller kohesjonen til bergmassen alene gir motstanden mot oppløfting av legemet. (Coates, 1970; Hobst og Zajíc, 1983 (Coates 1970; Hobst and Zajíc 1983; American society of civil engineers 1966; Brown 2015; Kim and Cho 2012).

Styrke og kohesjon er konstanter som avhenger av kvaliteten på bergmassen. For tilfeller der in-situ spenninger er null eller svært lave, og ingen andre spenninger påføres fra strukturer på bergmassen, kan skjærstyrken konservativt antas å være lik bergmassekohesjonen (US Army Corps of Engineers, 1994). En tredje måte er å legge både vekten av kjeglen og estimert motstand fra kohesjon, skjær- eller strekkstyrke på den totale løftemotstanden (Brown 2015).

Vinkelen på kjeglen varieres i henhold til antatte bergmasseegenskaper. Vanligvis brukes ned til 60° for svak, tett oppsprukket eller forvitret bergmasse, og 90° for sterke bergarter med lite sprekker. Det kan også brukes 80° for bergmasse av moderat kvalitet, eller 120° for høykvalitets bergmasse (Pedersen and Knutson 2004; Wyllie 2009; Statens vegvesen 2018). Plasseringen av kjeglespissen er typisk i midten eller enden av forankret lengde, og er til en viss grad avhengig av bergmassekvaliteten. Vanligvis antas kjeglespissen å være i midten av forankret lengde når det er snakk om bergmasse av lav kvalitet eller i tilfeller der egenskapene er ukjente på grunn av manglende data. Kjeglespissen antas å være i enden når bergmassen er av god kvalitet med få sprekker, bekreftet ved f.eks. uttrekksforsøk, eller hvis lastene fra staget overføres til bergmassen ved bruk av en endeplate eller kiler (Littlejohn and Bruce 1977). Brown (2015) sier også at en antakelse om 90° kjeglevinkel ikke trenger å være riktig for dype stag, fordi avstanden til overflaten har vist å ha en effekt for grunne, fullt innstøpte stag.

I et friksjonsmateriale uten kohesivitet regnes et forankringsstag som i nøytral tilstand når det er belastet utelukkende av vekten fra de overliggende massene. Hvis en staget påføres er strekkraft som

er mindre enn eller lik denne vekten, vil ikke staget bevege seg. Bruk av denne likevekten som et designkriterium fører imidlertid til borehullsdybder og stagtvvernsnitt med meget høy sikkerhetsfaktor. Dette designkriteriet blir derfor sjeldent anvendt i praksis. Ved å tillate en viss deformasjon i grunnen over staget og en viss grad av uttrekk, kan det vurderes større stagbelastninger enn om ingen bevegelse tillates. Den eksakte spenningstilstanden i grunnen som følge av stagspenningen er imidlertid vanskelig å uttrykke teoretisk. Dette er bl.a. fordi materialet ikke kan betraktes som elastisk mens det gjennomgår plastisk deformasjon og strekkspenninger kan oppstå. Skjærbrudd forventes ta form som en opp-ned kjegle rundt staget idet den endelige skjærstyrken er nådd ved overflaten. Kjeglevinkelen er lik to ganger vinkelen for indre friksjon, ϕ (Hobst and Zajíc 1983).

Forankringens kapasitet i løsmasser er avhengig av løsmassenes komprimeringsgrad. Økende komprimering øker friksjonskraften på den potensielle overflaten for skjærbruddet samt koeffisienter for tverrutvidelse. Spenninger fra staget overføres til en kil i den forankrede sonen og fører til radielle spenninger. De radielle spenningene øker med komprimeringsgraden til løsmassene, og bidrar til økt skjærstyrke og motstand mot uttrekk. Komprimerte løsmasser viser ofte dilatans ved skjærbrudd, noe som igjen øker spenningene, og dermed hindrer ytterligere uttrekking av staget. I mindre komprimert løsmasse kan et påbegynt skjærbrudd føre til økt komprimering, som igjen reduserer jordvolumet rundt forankringssonen. Dette gjør det vanskelig å sikre tilstrekkelig høy motstand mot uttrekk i ukomprimerte løsmasser. (Hobst and Zajíc 1983)

Til tross for tidligere og omfattende forskning på stagforankringer, er det fortsatt mangel på forståelse for stagets samvirke med omkringliggende jordmasser under oppløfting. De fleste studier har fokusert på å måle den endelige formen til det uttrukne legemet (Liu et al. 2012) og har ikke sett på hvordan bruddet utvikles.

Et hovedspørsmål er (1) om bruddet oppstår på hele overflaten av kjeglen øyeblikkelig eller (2) om bruddet utvikler seg fra bunnen av staget med progressivt bruddforløp til en kjegleform. Når det gjelder (1) er en beregning med skjærkapasiteten til materialet hensiktsmessig, derimot i tilfelle (2) bør man bruke en tilnærming som tar hensyn til initiering av bruddet og et progressivt bruddforløp.

Målet med studien er derfor å undersøke bruddforløpet i grunn som består av friksjonsmaterialer og av materialer med lav kohesjon, forårsaket av overbelastning av et innstøpt stag med en fri lengde mot overflaten. Dette inkluderer også å se på brudd- og lastutviklingen som er observert, og dens mulige påvirkning på kapasitetsberegninger for stag.

2 Utarbeidelse av fysisk modelltesting

2.1 Riggdesign

En mini testrigg (se Fig. 2) ble designet og bygget ved Institutt for geovitenskap og petroleum (IGP) ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, hvor testingen ble utført. Den består av en stiv lasteramme i stål med avtagbare, 10 mm tykke, gjennomsiktige PVC-glassplater montert på begge sider av rammen. PVC-platene og stålrammen danner et kammer med innvendige mål 60 cm (bredde) \times 40 cm (høyde) \times 10 cm (dybde), som skal inneholde testmaterialene. En 4 cm bred, 10 cm dyp og 41 cm høy blokk i termoplast (polyoksymetylen POM) er montert i et styrespor i midten av bunnen av testkammeret. Denne POM-blokken representerer staget. For å lage en stagsokkel som mobiliserer materialet under belastning, er en 20 cm lang seksjon på hver av blokkflatene som vender mot testmaterialent i kammeret frest med horisontale, halvsirkulære riller (radius 3,5 mm, avstand 5,5 mm). Den øverste 20 cm delen av blokken er glatt for å representere den frie staglengden, da den glatte overflaten forårsaker minimal mobilisering.

I virkeligheten påføres staget en belastning fra toppen av forankringslengden. Forankringslengden er fullt mobilisert og beveger seg mer eller mindre stivt når det oppstår kjegleformet brudd i materialet rundt staget. Det antas at bruddet ikke vil bli påvirket av om belastningen påføres på toppen eller bunnen av forankringslengden. Av praktiske årsaker påføres derfor belastningen fra bunnen av staget i forsøkene. Stagset er plassert i styresporet/slitte i stålrammen oppå en manuell hydraulisk jekk som

hviler på riggens stålfot. I denne posisjonen stikker den rillede seksjonen 16 cm inn i testkammeret. Ved pumping av jekken skyves staget vertikalt inn i testkammeret. Jekken er utstyrt med et vertikalt ekstensometer og lastecelle. Et digitalkamera i et stativ filmer den ene siden av riggen, og er koblet til en datamaskin som samtidig logger data fra belastningscellen og ekstensometeret under testene. Videoopptaket synkroniseres automatisk til ekstensometer- og lastregistreringene.



Fig. 2 Testriggoppsett: 1) Manuell hydraulisk jekk; 2) lastecelle og ekstensometer; 3) stållamme; 4) prøvekommer/PVC testkammer; 5) stagblokk; 6) kamera; 7) datamaskin og skjerm

2.2 Prøvematerialer

I studien ble det utført seks tester med forskjellige materialkonfigurasjoner vist i Tabell 1. Materialene i A- og B-testene var friksjonsmaterialer med ulike kornstørrelser, mens C var lavkohesive materialer. For A- og B-testene ble det brukt ett tørt og ett fuktig materiale. C-testene brukte kun én kornstørrelse som ble tilsatt små mengder sement i to forskjellige v/c-forhold. Grunnbergarten for alle materialer var eklogitt som var knust og siktet. For flere detaljer om materialene, se Tabell 2 og Tabell 3.

Tabell 1 Testkonfigurasjoner

Materialer	Antall tester
A.1: Tørr 0-3 mm eklogitt	2
A.2: Fuktig 0-3 mm eklogitt	2
B.1: Tørr 0,5-6,3 mm eklogitt	2

B.2: Fuktig 0,5-6,3 mm eklogitt	2
C.1: 0-3 mm eklogitt, 4 % sement	1
C.2: 0-3 mm eklogitt, 2 % sement	1

Tabell 2 Egenskaper til materialene brukt i A- og B-testene

Parameter	Enhet	Eklogitt, 0-3 mm		Eklogitt, 0,5-6,3 mm	
		Tørr (A.1)	Fuktig (A.2)	Tørr (B.1)	Fuktig (B.2)
Fuktinnhold, w	%	Tørke	7	Tørke	5
Gjennomsnittlig løs tetthet, ρ_L	kg/l	1.8	1.5	1.8	1.6
Gjennomsnittlig komprimert tetthet, ρ_C	kg/l	2.1	2.3	2.1	2.1
Graderingstall, C_u			22		4.5
Maksimum friksjonsvinkel, φ_{maks} *	°	39	35	43	38
Residual friksjonsvinkel, φ_{er} **	°	36	-	38	-

*Fra direkte skjær test på moderat komprimerte prøver etter tilnærmingen beskrevet av Opsal (2017)

** φ_{er} er lik residual friksjonsvinkel etter max last for tester som utviser maksimum verdi

Tabell 3 Egenskaper til materialene brukt i C-testene

Testmateriale	Komponent (vekt %)			Herdetid	w/c Forhold	Tetthet (kg/dm ³) *	UCS (MPa) *
	0-3 mm eklogitt	Vann (w)	Sement (c)				
C.1	84	12	4	3 dager	4	2,26	0,660
C.2	86	12	2	3 dager	6	2,33	0,473

*Verdier oppgitt som gjennomsnitt fra 3 kjerneprøver.

2.3 Prøveforberedelse

For klargjøring av prøvene i riggen ble det brukt to forskjellige metoder, en for friksjonsmaterialene og en for lavkohesive.

For test A og B ble materialet lagt lagvis inn i testriggen. Hvert lag besto av ca. 3 liter materiale og ble komprimert ved å banke 60 ganger for hånd med en komprimator. Etter hver komprimering ble et hvitt kontrastmineral lagt inntil PVC-glassoverflaten for å gi en visuell referanse under testen. For å begrense utbuling av PVC-glasset ble kammeret klemt med klemmer før fyllings- og komprimeringsprosessen startet. Høyden på prøvematerialet var ca. 30 cm. Et eksempel kan sees i Fig. 3.



Fig. 3 Eksempel på friksjonstest klar til å kjøres

For C-testene var prosedyren for prøvepreparering litt annerledes. For å hindre at sementen festet seg til PVC-platene, ble de smurt med formolje. Den våte materialblandingen ble plassert i testkammeret i én operasjon, moderat komprimert for hånd for å fjerne luftlommer, og fikk herde i 3 dager. På dag 2 ble PVC-platene løsnet litt fra materialet for å la overflødig fuktighet fordampe og for å sikre at materialet løsner fra overflatene. Før testing, på dag 3, ble PVC-platene satt sammen igjen.

Under test C.1 ble det oppdaget at friksjonen mellom riggsidene og materialet var for lav, da prøven begynte å gli oppover. For C.1 ble dette løst ved å klemme klosser på toppen av prøven på hver side (se Fig. 4) og for prøve C.2 ble det løst ved å øke friksjonen i prøve/rigg-grensesnittet med grovt sandpapir.



Fig. 4 Oppsett av test med lavt kohesivt materiale, C.1.

2.4 Testprosedyre

Testprosedyren var lik for alle testene. Testingen startet med å pumpe den hydrauliske jekken for å sette trykk på staget. Den vertikale deformasjonen og trykket ble registrert under videre jekking mens bruddet i testmaterialet ble tatt opp av videokameraet. Staget ble trykksatt til det gled gjennom materialet eller til jekken nådde sin maksimale forlengelse (50 mm).

2.5 Apparatkalibrering

For å estimere den indre friksjonen til stagblokken mellom PVC-platene ble det utført en kalibrering uten noe materiale i kammeret. Kalibreringstesten ble utført før oppstart av forsøkene og gjentatt etter siste forsøk for å kontrollere om denne verdien har endret seg under bruk. Den indre friksjonen før forsøkene varierer mellom ca. 0,35-4,0 kN etter 1 mm deformasjon, og 0,26-0,33 kN etter siste forsøk. Reduksjonen er sannsynligvis forårsaket av maling på stålet som slites av og en liten utbuling av PVC-platene.

2.6 Beregning av uttrekksmotstand

Som nevnt innledningsvis har uttrekksmotstanden to komponenter: Vekten av uttrekkslegemet (F_W) og motstanden mot brudd i materialet (F_M) som staget er omsluttet av. For disse testene kan de forskjellige komponentene skilles fra hverandre ved å ta eliminere kraften fra testtriggens indre friksjon (F_{sys}). Volumet til det koniske uttrekkslegemet beregnes først:

$$V = \tan \alpha \times (h - x)^2 \times w \quad (1)$$

hvor h er materialhøyden før testen. Høyden fra testkammerets bunn til der bruddplanet treffer stagblokken er x , og w er dybden på testkammeret. Vekten til uttrekkslegemet blir deretter funnet ved:

$$F_W = \rho_c \times V \times g \quad (1)$$

hvor g er tyngdeakselerasjonen, $9,8 \text{ m/s}^2$.

Man kan da finne en estimert korrigert maksimum motstand (P_c) ved å trekke systemets gjennomsnittlige indre friksjon fra maksimum last (P), $P_c = P - F_{\text{sys}}$. Da blir det også mulig å beregne forholdet mellom F_M og P_c . Se kapittel 3.4.

3 Resultater fra fysisk modelltesting

3.1 Friksjonsmaterialets oppførsel

Last/deformasjons-kurvene fra prøver med friksjonsmaterialet er vist i Fig. 5 og Fig. 6. Basert på kurvene er det vanskelig å identifisere forskjeller knyttet til variasjonen i partikkelstørrelse og gradering. Det ser imidlertid ut til at det er forskjell på de tørre og de fuktige prøvene, hvor de tørre prøvene gir/viser langsommere bruddutvikling med hensyn til deformasjonen enn de fuktige. Til tross for forskjellen i deformasjonsatferd, ga alle testene last/deformasjons-kurver med en typisk utvikling, som kan beskrives ved fire karakteristiske faser: (1) elastisk/lineær utvikling (2) pre-peak brudd, (3) post-peak svekkelse/avtakende motstand, (4) løfte-/slippfase, som er vist i Fig. 7.

Fase 1, den elastiske/lineære utviklingen, er preget av en bratt lastøkning i løpet av de første 1,0-1,5 mm med stagdeformasjon. Deretter, i fase 2, ved tidspunkt for den første synlige deformasjon, begynner kurvens helning å avta med ytterligere deformasjon inntil staget oppnår sin maksimale last ved ca. 5 mm deformasjon. Bruddet begynner å dannes i løpet av denne fasen og den starter som en liten separasjon av materialet nær bunnen av stagblokken og forplanter seg i form av en V mot prøveoverflaten (se Fig. 8). Selve bruddlegemet er typisk smalere enn den totale mobiliserte delen av materialet. Bruddet fortsetter å forplante seg idet staget når og passerer maks last, og går dermed inn i svekkelsesfasen/post-peak. Det ser imidlertid ut til at det er en liten forskjell mellom tørr og fuktig eklogitt der overgangen fra fase 1 til fase 2 er mer gradvis og starter tidligere for eklogitten som er tilsatt vann. Man kan også se at gjennomsnittlig maksimallast er høyere for de tørre enn for de fuktige prøvene.

Post-peak-fasen er preget av videreutvikling av bruddutbredelsen, og staglasten gradvis avtar med deformasjon. I de fleste tilfeller ser bruddet ut til å ha utviklet seg fullt ut til overflaten (se Fig. 9) ved 2-4 mm deformasjon etter oppnådd makslast. Merk at det nøyaktige tidspunktet når bruddet har nådd overflaten er vanskelig å bestemme i noen av testene, da det ble observert at bruddsporet kunne være dekket av løst materiale som falt fra undersiden av uttrekkslegemet etter hvert som bruddfronten beveget seg oppover. Når bruddplanene ser ut til å ha nådd overflaten, avtar staglasten med deformasjonen. Lasten avtar med en oppførsel mellom lineært og eksponentielt, samtidig som uttrekkslegemet blir mer definert/separert fra det underliggende materialet (se Fig. 10).

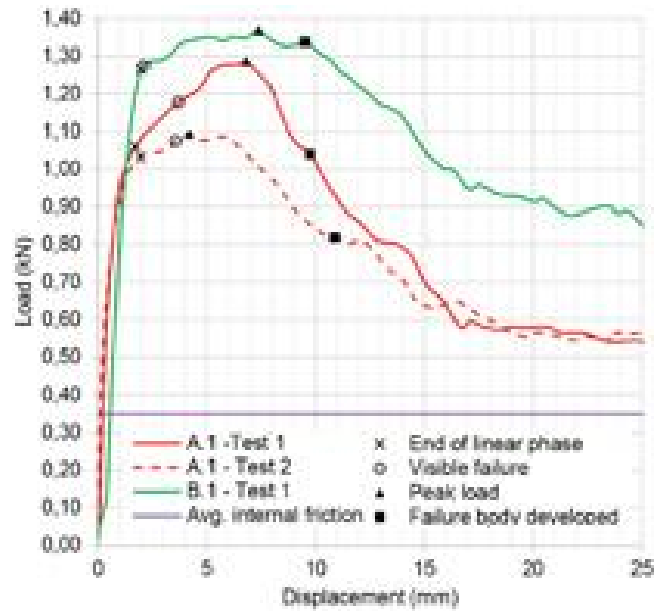


Fig. 5 Last/deformasjonsforhold for testing av tørt friksjonsmateriale. Data fra B.1 – Test 2 mangler på grunn av problemer med opptakststyret.

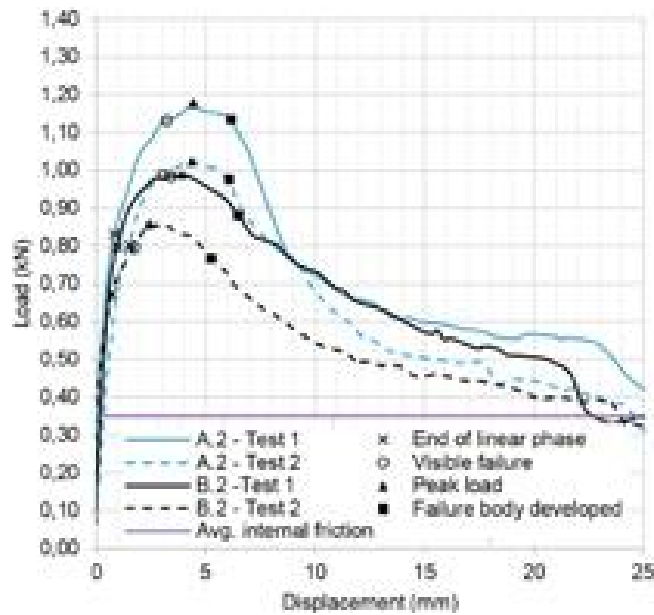


Fig. 6 Last/deformasjonsforhold for friksjonsmaterialet med tilsatt vann.

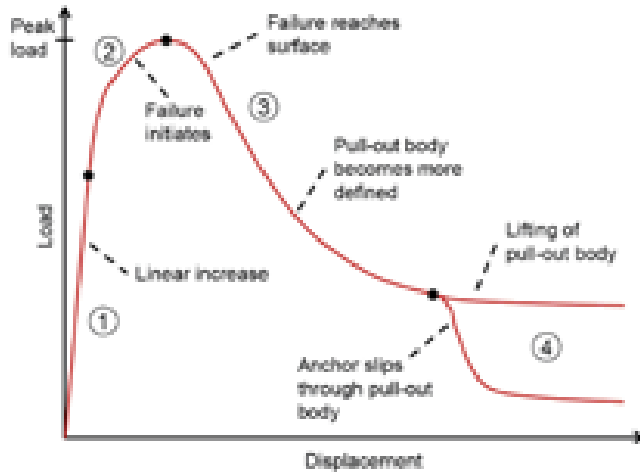


Fig. 7 Karakteristisk last-deformasjon basert på de lavkohesive testene

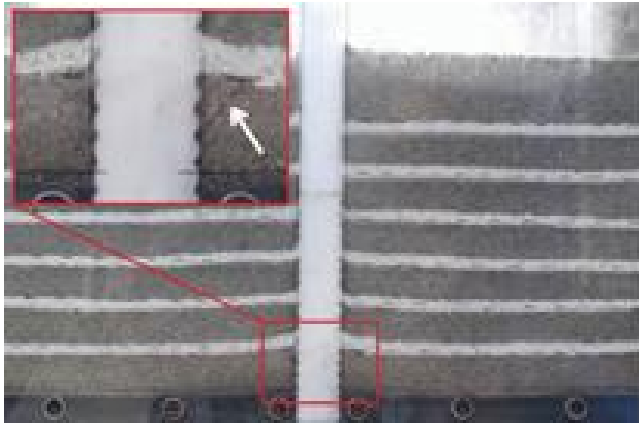


Fig. 8 Start av dannelsen av en V-formet brudd i A.2 – 1, markert som en sirkel i Fig. 5.



Fig. 9 Brudd utviklet til overflaten for A.2 – 2



Fig. 10 Brudd etter videreutvikling for A.2 – 2

3.2 Lav-kohesiv-materialets oppførsel

Resultater fra de lavkohesive prøvene viser en viss likhet med friksjonsmaterialene beskrevet ovenfor (se Fig. 11), nemlig den nesten lineære, brå lastøkningen i pre-peak-fasen, etterfulgt av initieringen av et bruddplan. Til forskjell fra friksjonsmaterialene, hvor bruddet utvikler seg fra et punkt nær bunnen av staget, oppstår bruddet i midten av hver halvside av de lavkohesive prøvene, som vist i Fig. 12 og Fig. 13. Bruddet dannes ved maksimum last for prøve C.2 (prøven med 2% sementinnhold) mens før topplasten for C.1 (prøven med 4% sementinnhold). Etter at det første bruddet oppstår, vokser det i begge retninger – ned mot bunnen og mot overflaten, og utvikler seg til et V-formet bruddlegeme.

Når det gjelder C.1, stopper bruddet på et punkt som ligger under blokkene på overflaten før det når topplasten. Herfra vises flere brudd i en sone som ligger under hjørnene på blokkene. Denne sonen utvikler seg til overflaten samtidig som motstanden reduseres i post-peak-fasen, se Fig. 14.

For C.2, når bruddet har nådd overflaten/sidene etter 5 mm deformasjon, er det kun små broer av intakt materiale som bidrar til stagets motstand, som vist på Fig. 15. Ettersom disse gradvis brytes av, reduseres belastningen med deformasjon, og nærmer seg til slutt en belastning som tilsvarer systemets indre friksjon pluss vekten av det endelige bruddlegemet.

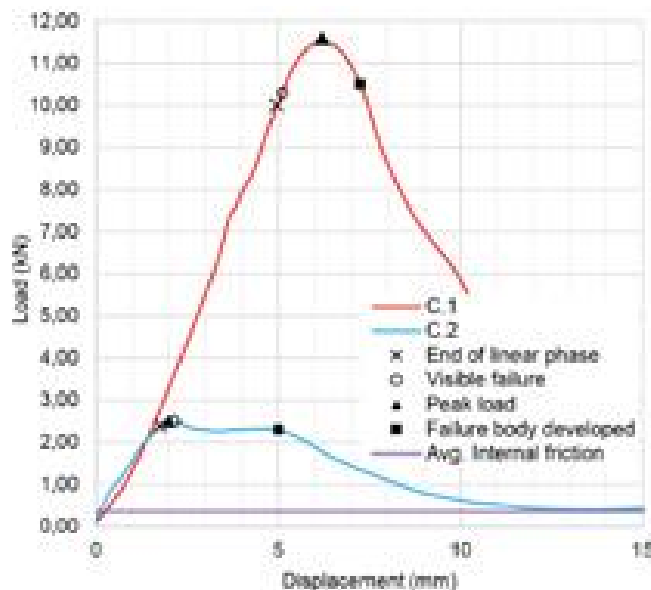


Fig. 11 Last/deformasjonsforhold for friksjonsmaterialtestingen.

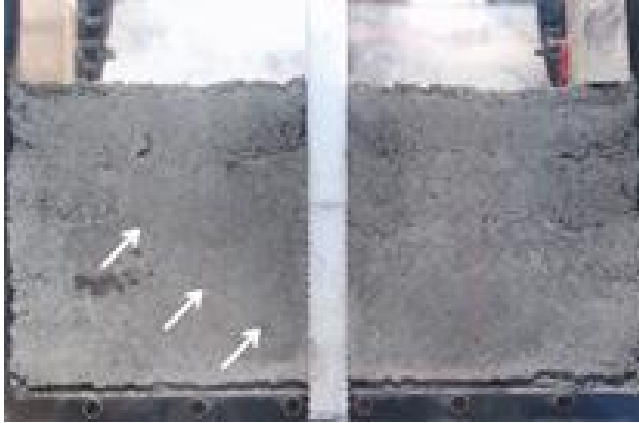


Fig. 12 Bruddstart av test C.1

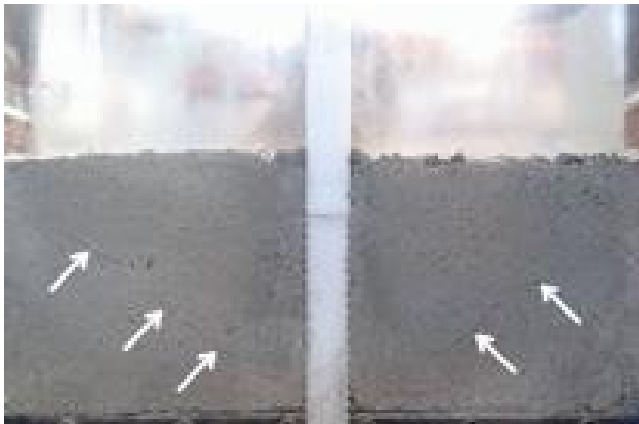


Fig. 13 Bruddstart av test C.2



Fig. 14 Bruddmønster for test C.1 Bruddsone som går oppover overflaten, med en rekke sub-horisontale brudd under blokken.



Fig. 15 Bruddmønster for test C.2.

3.3 Målinger av bruddlegeme

Målingene av bruddlegemet er presentert i Tabell 4 og inkluderer hvor bruddlinjene treffer stagblokken, målt vertikalt på stagblokken fra bunnen av testkammeret (se eksempel fra test A.2 - 2, Fig. 16a)); vinkelen til de første bruddplanene til stagblokken (se Fig. 16b)), samt vinkelen til den endelige bruddformen (måles i midten av prøve, se Fig. 16c). I tilfeller der den endelige vinkelen nede ved stagblokken avviker sterkt fra den opprinnelige vinkelen, er den endelige vinkelen også oppført, ellers forblir vinkelen omtrent den samme som opprinnelig.

Tabell 4 Målte verdier av bruddlegemer. Vinkler er oppført som henholdsvis venstre og høyre sidemål.

Test	Spisspunkt [cm]		Vinkel ved sokkel [°]		Vinkel i sentrum [°]		Beskrivelse av bruddform		
	Venstre	Ikke sant	Første L/R	Endelig L/R	Endelig L/R	Endelig L/R			
A.1 - 1	4.0	3.0	29	26	40	38	Omvendt kjegle med konkave sider		
A.1 - 2	3.0	3.5	42	36	42	36	Omvendt kjegle med rette sider		
A.2 - 1	1.0	1.0	43	43	39	38	Omvendt kjegle med konkave sider		
A.2 - 2	1.0	2.5	42	52	32	28	42	36	Omvendt kjegle med konkave sider
B.1 - 1	1.5	1.5	45	52	30	30	30	30	Omvendt kjegle med konkave sider; kontinuerlig krympende; brudd ved stag beveger seg oppover
B.1 - 2	1.5	1.5	25	50	35	34	32	34	Tulipanformet; kontinuerlig krympende; brudd ved stag beveger seg oppover
B.2 - 1	3.5	4.5	32	36			32	36	Omvendt kjegle med lett konkave sider
B.2 - 2	3.5	4.0	31	37			37	38	Omvendt kjegle med konkave sider
C.1	2.0	3.0			50	50	50	50	Omvendt kjegle, svakt konkav på den ene siden
C.2	1.5	2.5			55	55	55	55	Omvendt kjegle, rette sider

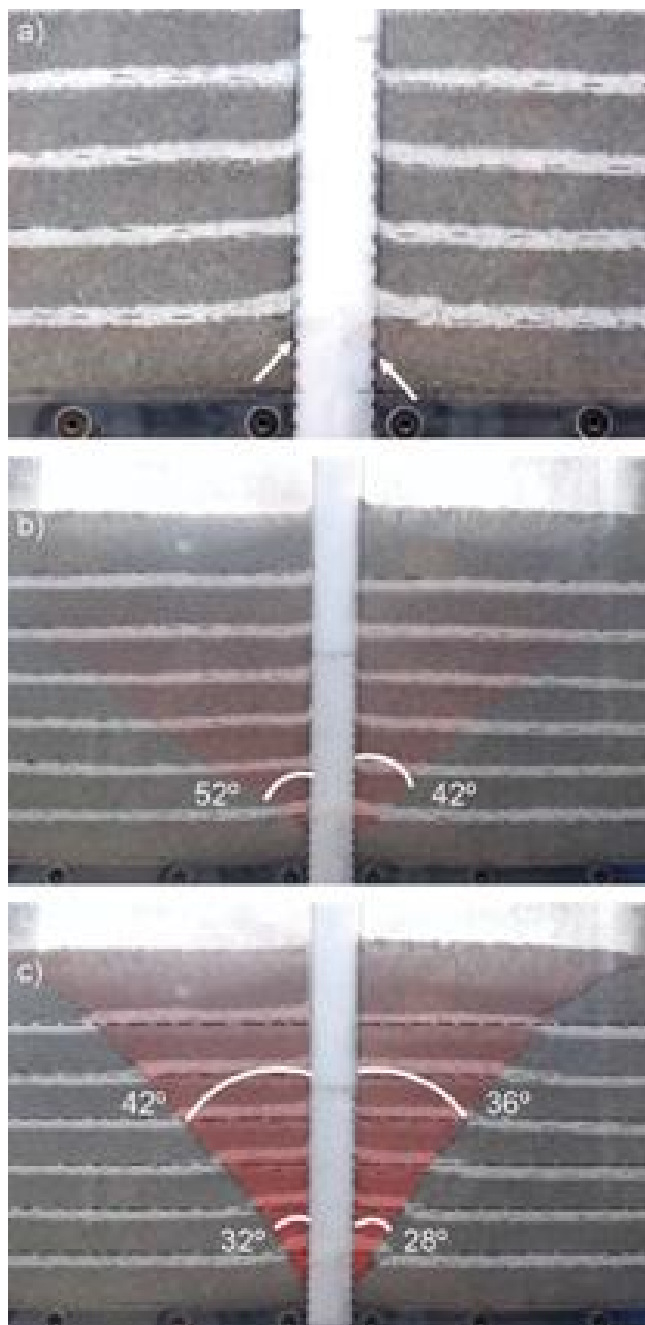


Fig. 16 Eksempel på bruddmålinger på A.2 – 2. a) Startpunkt for bruddstart b) Startvinkel på bruddflater c) Form på endelig bruddlegeme

3.4 Beregning av uttrekksmotstand

Uttrekksmotstanden forårsaket av vekten til uttrekkslegemet og materialmotstanden mot brudd er beregnet ved å bruke metoden beskrevet i kapitel 2.6 og vist i Tabell 5. I beregningene ble det brukt en F_{sys} på 0,355 kN og den bredeste uttrekksvinkelen observert i testene. Som vist i den nederste raden, forholdet mellom belastningen fra friksjonskomponenten og den korrigerte maksimale lasten, forklares opptil 85 % av den totale belastningen som friksjonskraft for løsmassene og opptil 98 % for lavkohesivt materiale.

Tabell 5 Beregning av motstand fra vekt av uttrekkslegeme, W, ved de bredeste vinklene observert i hver friksjonsmaterialtest.

Test		A.1 - 1	A.1 - 2	A.2 - 1	A.2 - 2	B.1 - 1	B.2 - 1	B.2 - 2	C.1	C.2
Volum, V	m ³	$6,12 \cdot 10^{-3}$	$5,83 \cdot 10^{-3}$	$6,80 \cdot 10^{-3}$	$8,02 \cdot 10^{-3}$	$9,26 \cdot 10^{-3}$	$4,21 \cdot 10^{-3}$	$4,90 \cdot 10^{-3}$	$8,93 \cdot 10^{-3}$	$5,56 \cdot 10^{-3}$
Vekt, F _w	kN	0,126	0,123	0,153	0,181	0,191	0,087	0,101	0,198	0,127
Toppkraft, P	kN	1,20	0,968	1,04	0,853	1,16	0,773	0,901	11,6	2,50
Gj.sn. res. F _{sys}	kN	0,355	0,355	0,355	0,355	0,355	0,355	0,355	0,355	0,355
Corr. P, P _c	kN	0,847	0,613	0,685	0,498	0,806	0,418	0,546	11,2	2,14
F _M	kN	0,721	0,493	0,532	0,317	0,615	0,331	0,446	11,0	2,02
F _M /P _c		0,85	0,80	0,78	0,64	0,76	0,79	0,82	0,98	0,82

4 Numerisk modellering

Todimensjonale numeriske modeller ble laget i RS2 (Rocscience Inc. 2020) for å gjenskape forsøkene i den fysiske testtriggen så nøyaktig som mulig. På den måten kan man undersøke videre hvilke parametere som er viktige for bruddutvikling og deformasjon, og få en indikasjon på hva som kan skje ved andre forhold enn de som ble fysisk testet. Det viste seg meget vanskelig å modellere de lavkohesive testene da modellen er meget sensitiv for spesielt elastisitetsmodul og raten lasten påføres på. Det ser ut til at forsøkene er helt i grensen for hva koden kan simulere og det måtte derfor bli benyttet E-moduler som avviker fra laboratorietestene for å oppnå fornuftige resultater i noen av modellene.

4.1 Utforming av numeriske modeller

4.1.1 Geometri og randbetingelser

En modell med samme dimensjoner som testkammeret og "stagblokken" ble opprettet (se Fig. 17) og tildelt følgende grensebetingelser:

- fri flate på toppen på testmaterialet
- faste vertikale ytre grenser
- ruller på den horisontale, nedre grensen
- faste hjørner
- sprekker mot stagblokken

Grensesnittet mellom testmaterialet og den bevegelige blokken ble modellert ved å lage to forskjellige sprekkeflater rundt blokken - en kunstig sterk sprekke som representerer den grove sokkelen, "Socket Joint", den andre en svak, kalt "Smooth Joint". Disse sprekkeoverflatene er nødvendige fordi modellene vil oppføre seg som et kontinuum hvis kun materialgrenser brukes til å skille materialene, og dermed ikke tillate at det oppstår glidning mellom materialene. RS2 tillater at både elastisk og uelastisk glidning kan forekomme langs en sprekkegrense, og sprekker tildeles styrke- og stivhetsegenskaper som styrer hvordan grensene/sprekken reagerer.

Det oppstår imidlertid et problem på stedet der stagblokken og nedre materialgrenser skjærer hverandre da nodene må tilfredsstille den virkelige fysiske oppførselen til begge: a) den ubevegelige bunnrammen, og b) det bevegelige grensesnittet til blokken når den passerer denne plasseringen. Løsningen var å bruke en fast node på disse to punktene. Problemet med kompatibilitet ble løst ved å sørge for at den vertikale deformasjonen ikke oversteg den lokale elementstørrelsen på disse punktene.

Derfor ble mesh-elementtettheten økt til over 10,0 mm fra bunnrammen mens elementene ved de faste nodene ble satt litt større.

De faste nodene skaper imidlertid urealistisk høye og lave spenninger inne i stagblokken på disse punktene. Dette betyr at bruk av last for å styre deformasjonen ikke vil være hensiktsmessig for dette oppsettet, og det ble derfor satt en fast deformasjon i flere steg for å kontrollere stagbevegelsen. Resultater fra de fysiske modellene viste at brudd starter i god tid før sokkelen når 10 mm deformasjon, som er en grense for modellen på grunn av de faste nodene. Tabell 6 viser den påsatte vertikale deformasjonen til stagblokken i hvert trinn.

Tabell 6 Tildelt vertikal deformasjon på stagblokkens skjøtegrenser på hvert trinn

Steg nr.	Deformasjon [mm]
1	0,0
2	0,5
3	0,75
4	1,0
5	1,5
6	2,0
7	2,5
8	3,0
9	3,5
10	4,0
11	4,5
12	5,0
1. 3	5,5
14	6,0
15	6,5
16	7,0

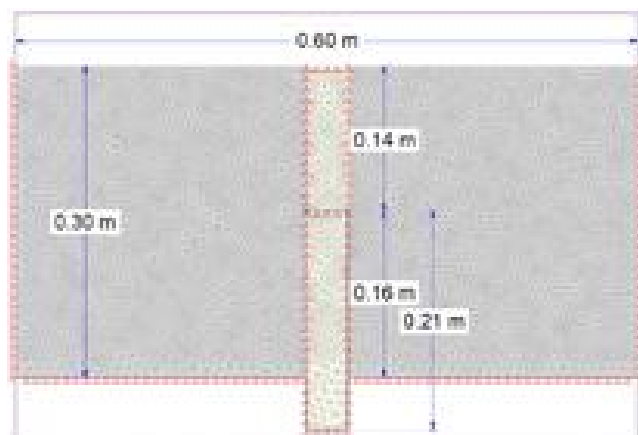


Fig. 17 Geometrioppsett, maske- og grenseforhold for modell i RS2 for Soil 1- initial stage.

4.1.2 Materialparametere

De valgte materialparametrene stammer fra både laboratorietester og erfaringsverdier. Fysiske laboratorietester på materiale A.1 (0-3 mm tørr eklogitt) danner grunnlaget for inputparametere i materialmodell «Soil 1». Verdier for E-modul og Poissons ratio er estimert fra typiske jordegenskaper (Subramanian, 2008). Modell Rock 1 og Rock 2 har som mål å gjenskape funn fra tester på de lavkohesive materialene, C.1 (0-3 mm eklogitt, 4 % sement) og C.2 (0-3 mm eklogitt, 2 % sement). E-

modulene for Rock 1 og Rock 2 måtte settes kunstig lave for å oppnå likhet med de fysiske testene. Kohesjonsverdien estimeres ved å konstruere Mohrs sirkel med gjennomsnittlige UCS-verdier og antatte indre friksjonsvinkler på 60° og 55° for henholdsvis Rock 1 og Rock 2. Strekkstyrken ble estimert til 0,1 x kohesjonen, deretter justert inkrementelt basert på samsvar mellom de fysiske observasjonene og de numeriske resultatene. De endelige materialinnsatsegenskapene brukt i modellene er oppført i Tabell 7 og Tabell 8.

Tabell 7 Mekaniske egenskaper til skjøter som definerer den bevegelige blokken.

Sprekke	Bruddkriterium	Strekkstyrke [MPa]	Maks kohesjon [MPa]	Maks friksjonsvinkel [°]	Normal stivhet [MPa/m]	Skjærstivhet [MPa/m]
Smooth	Mohr-Coulomb	0,0	0,0	0,1	1000	100
Socket	Ingen	N/A	N/A	N/A	2000	2000

Tabell 8 Materialinngangsverdier

Eiendom	Soil 1	Rock 1	Rock 2	Stagblokk
Enhetsvekt (MN/m ³)	0,0210	0,0226	0,0233	0,0270
<i>Stivhet</i>				
Poissons forhold, ν	0,25	0,30	0,30	0,10
E-modul [MPa]	100	32*	5*	50 000
Residual Young's Modulus [MPa]	N/A	N/A	N/A	N/A
Bruddkriterium	MC	MC	MC	MC
Materialtype	Plast	Plast	Plast	Plast
<i>Styrke</i>				
Maksimal strekkstyrke [MPa]	0	0,075	0,060	10
Toppfriksjonsvinkel [°]	39	60	55	45
Peak Cohesion [MPa]	0	0,12	0,075	50
Gjenværende friksjonsvinkel [°]	36	40	40	N/A
Residual Cohesion [MPa]	0	0	0	N/A
Utvidelsesvinkel [°]	0	0	0	N/A

*kunstig lav E-modul

4.1.3 Spenninger

Spenningene i modellene er basert på vekten av det overliggende materialet og med et vertikalt til horisontalt spenningsforhold på $k = 1$. For Soil 1-modellen ble det påført en ekstra innlåst horisontal spenning på 0,0001 MPa for å simulere en liten horisontal spenningsøkning fra komprimeringen i den fysiske modellen. Generelt var modellens opprinnelige spenningstilstand relativt liten sammenlignet med spenningene induisert av bevegelsen til stagblokken.

4.1.4 Sprekkeparametere

Smooth Joint ble tildelt en ubetydelig lav styrke da den er ment å gli fra første bevegelse. Stagblokken er ikke tilordnet et glide-kriterium, noe som betyr at kontaktdeformasjonen er proporsjonal med normal- og skjærstivhet. På denne måten vil fokuset være på å studere brudd i selve prøvematerialet, snarere enn på kontaktflaten.

4.2 Numeriske modelleringsresultater

Som nevnt i kapittel 4.1.2 tar de tre materialmodellene sikte på å reprodusere de fysiske materialtestene A.1 (Soil 1), C.1 (Rock 1) og C.2 (Rock 2). I det følgende presenteres en analyse av de tre modellene.

4.2.1 Material Soil 1

I Fig. 18 er spenningstilstanden for σ_1 vist etter 1 og 3,5 mm stagdeformasjon. Endringen av orienteringen til σ_1 og σ_3 skjer allerede når bare en liten deformasjon er påført stagblokken. σ_1 buer seg synlig fra et område med spenningskonsentrasjon ved kontaktflaten på stagblokken mot

materialoverflaten, og er konsentrert i en V-formet sone med spiss 3,5 mm fra stagbasen. Retningen til σ_1 skråner ca. 45° fra stagets akse, som vist i Fig. 18 a). Etter 4 mm deformasjon, som er omtrentlig når synlig brudd først startet i den fysiske testen (A.1 – 1), har spenningssonen har blitt smalere, til 33°-35° fra stagets akse.

Ved å studere den totale deformasjonen over flere steg viser plottene at staget mobiliserer materialet i en bred V-formasjon. Den påvirkede sonen har sin bunn 1,0-1,5 cm fra stagbasen og strekker seg til nesten hele overflatens bredde. Fig. 19 viser den totale deformasjonen ved 1,0 mm stagdeformasjon, hvor bevegelsen først ble observerbar i en V-formet del av den fysiske prøven. Legg også merke til at deformasjonen av overflatematerialet nær staget overstiger stagets deformasjon noe.

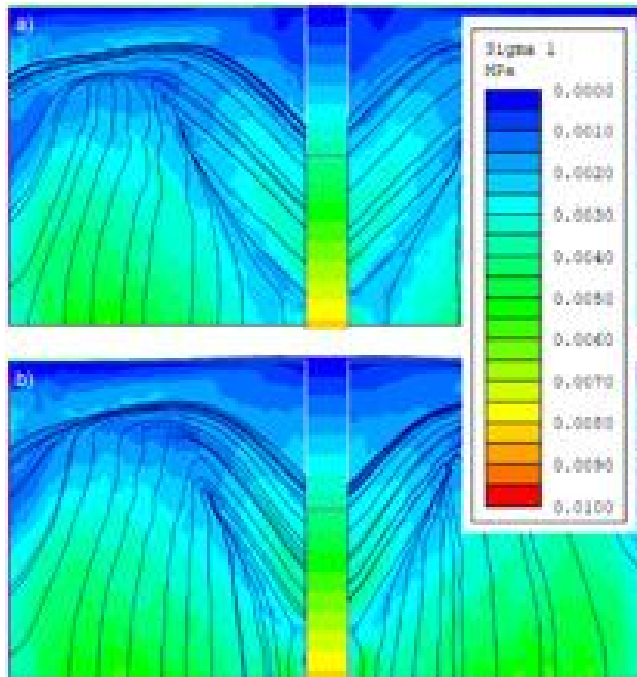


Fig. 18 σ_1 spenningstilstand (farger) og retningen til σ_1 som spenningsstrømningslinjer (blå) ved, a) 1,0 mm stagdeformasjon og b) 4 mm deformasjon

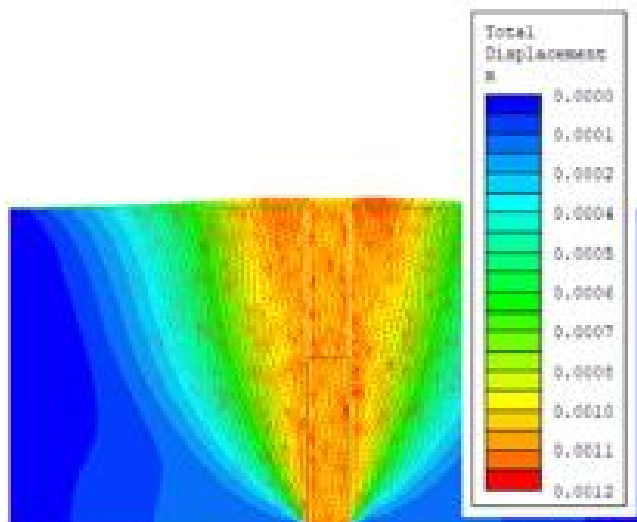


Fig. 19 Totaldeformasjon ved 1 mm stagdeformasjon

4.2.2 Material Rock 1

Siden modellen for Rock 1 tar sikte på å reprodusere den fysiske testen av materiale C.1, ble noen av grensebetingelsene endret fra det som er beskrevet for Soil 1. Den numeriske modellen er satt opp for å samsvare med modifikasjonene til den fysiske modellen, vist i Fig. 4, og har derfor vertikalt fikserte noder på overflaten som strekker seg 4,0 cm inn fra de øverste hjørnene, og ruller horisontalt.

Når en liten deformasjon ble påført staget, forårsaket det en reorientering av hovedspenningene, og initierte både skjær- og strekkbrudd i materialet. σ_1 konsentrerer seg i et punkt rundt 3,5-4,0 cm opp på stagsokkelen, og forgrener seg utover (se Fig. 20) på skrått fra stagaksen i form av en stor V. En tynn bruddsone følger sonen for spenningskonsentrasjon i bunnen.

Spenningen innenfor den σ_1 -påvirkede sonen fortsatte å stige ettersom staget forskjøv seg oppover og skjær- og strekkbruddet fortsatte å forgrene seg i en bred U-form fra omtrent 4 cm opp på stagsokkelen som vist i fig. Fig. 21. Etter at det første bruddet forplantet seg til veggene, dukket det opp nye fra samme lokasjon. Disse hadde en smalere vinkel fra stagaksen, mellom 65° - 50° , og strekker seg opp til 11 cm inn i materialet. Etter 5,0 mm stagdeformasjon går materialet til brudd innenfor trykksonen og skaper et nytt bruddlegeme som vist i Fig. 21b).

Deformasjonene styres i stor grad av omfanget av bruddet i hvert steg. Se Fig. 22. Det første bruddet skaper et stort legeme som forskyver seg oppover med staget. Under den ligger materialet i ro. Det andre bruddlegemet, avgrenset av de 50° skrånende bruddene, fortsetter å forskyves med staget, mens bevegelsen under det gradvis avtar.

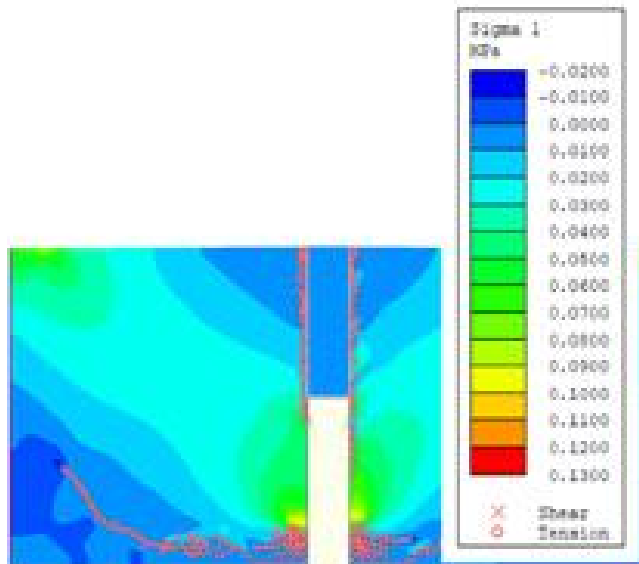


Fig. 20 σ_1 spenningstilstand ved 0,5 mm stagdeformasjon

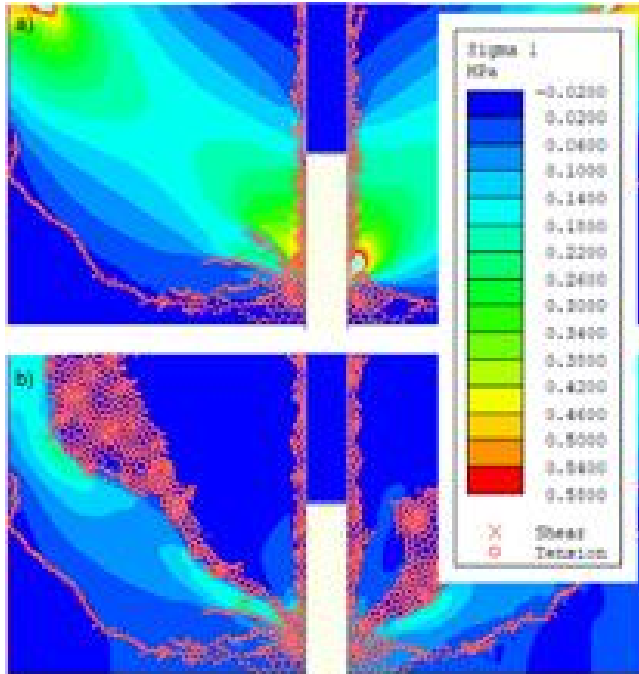


Fig. 21 σ_1 spenningstilstand (konturplott) ved, a) 4,5 mm stagdeformasjon og b) 5,0 mm deformasjon

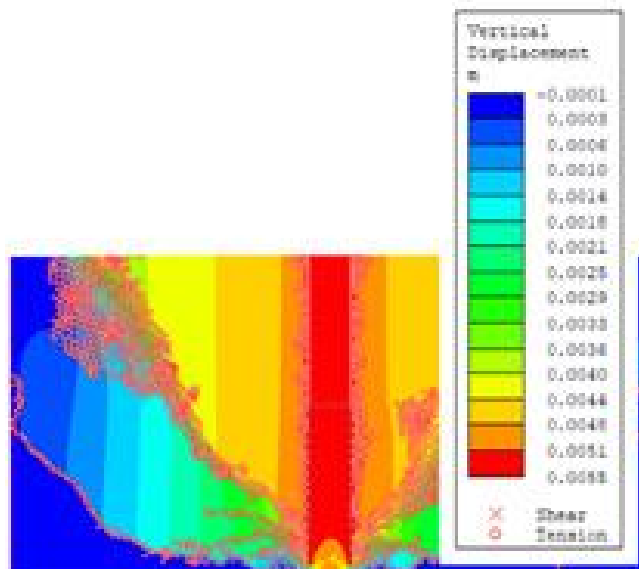


Fig. 22 Vertikal deformasjon ved 5,5 mm stagdeformasjon, som viser et nytt tydelig utviklet bruddlegeme.

4.2.3 Material Rock 2

Materialhøyden i modellen senkes til 20 cm for å tilsvare den fysiske testen C.2. Grenseforholdene på siden og toppen er ikke modifisert som for Rock 1 og er dermed de samme som for Soil 1. I likhet med både Soil 1 og Rock 1 fører en liten deformasjon av staget til en reorientering av hovedspenningene, hvor σ_1 er konsentrert innenfor en spenningsbue med brudd plassert på sokkelen 2,0-2,5 fra bunn. Et kombinert strekk- og skjærbrudd starter ved stagsokkelen og forplanter seg utover med en helning på 55°-60°, etter σ_1 -banene (Fig. 23). Bruddet følger formen til den økte trykksonen og sammenfaller med områdene med størst spenning.

Bruddutviklingen starter nesten momentant og har allerede begynt å forplante seg ved en stagdeformasjon på 0,5 mm og man kan se, vist i Fig. 24, at den totale deformasjonen er sterkt relatert

til bruddbredden. Etter hvert som staget fortsetter å forskyves, utvides bruddet og skaper et tydelig avgrenset legeme. Under den er materialet i ro som vist i Fig. 25.

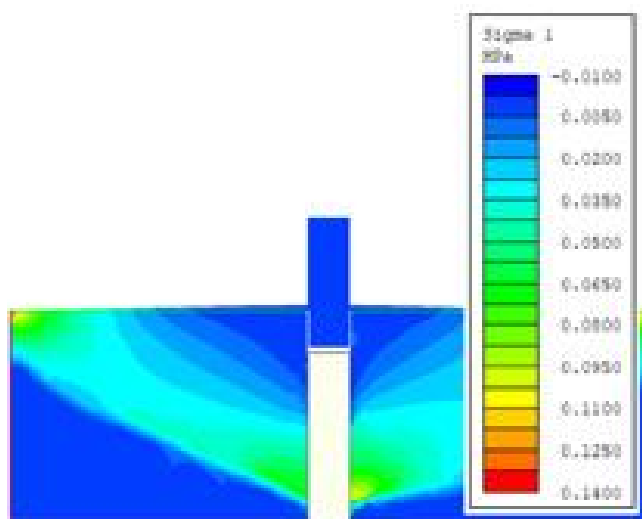


Fig. 23 σ_1 spenningstilstanden (farger) og spenningsstrømmen (blå linjer) ved 5 mm stagdeformasjon

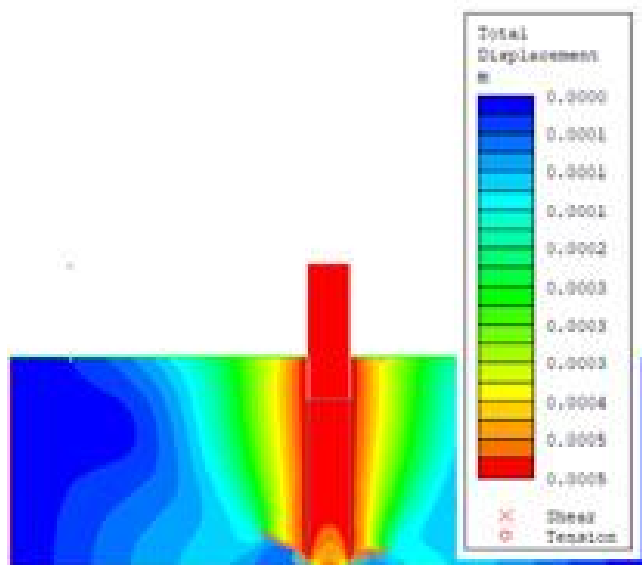


Fig. 24 Total deformasjon ved 0,5 mm stagdeformasjon

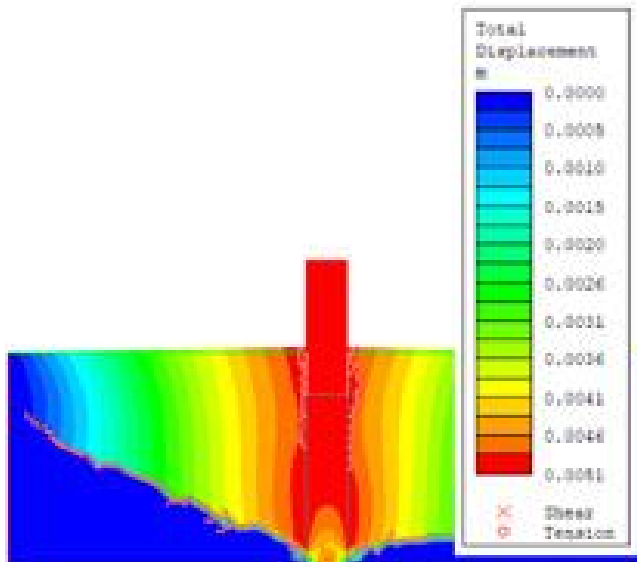


Fig. 25 Total deformasjon ved 5,0 mm stagdeformasjon

5 Diskusjon

Denne studien ble designet for å undersøke hvordan friksjons- og lavkohesive materialer går til brudd ved en overbelastning forårsaket av et stag. En serie fysiske tester ble utført, fulgt av numerisk modellering som forsøkte å reprodusere de fysiske testene. Resultater fra de ulike fysiske testene og numerisk modellering viser noen karakteristiske likheter med hverandre, både når det gjelder last-deformasjonskurvene og bruddmønstrene i materialet.

I alle de fysiske testene med friksjonsmaterialene forplanter bruddene seg oppover på skrått fra et punkt på stagsokkelen. Plasseringen av dette punktet varierer mellom de forskjellige materialene, men er omtrent konsekvent for hvert enkelt material og er vanligvis innenfor den nederste fjerdedelen av sokkelen. Utover dette er det ikke funnet noen sammenheng mellom fuktinnhold eller kornstørrelse med hensyn til bruddstartpunktets plassering. Litteraturen som er sitert i innledningen angående plassering av bruddets startpunkt på den forankrede lengden angir enten en plassering i bunnen av staget, for fast berg eller ved bruk av en endeplate, eller på midten for svakere berg. Skalaforskjellen mellom testene og et in-situ-stag gjør det vanskelig å overføre resultatene, siden man ikke vet om en oppskalering av testen vil føre til at startpunktet er på samme sted (cm over) eller i samme prosentandel over bunnen. Det kan imidlertid virke som om det for et friksjonsmateriale kan brukes en lavere plassering enn midten av det forankrede området.

Vinkelen til de endelige bruddflatene varierer typisk med noen få grader fra maksimal friksjonsvinkel, og skaper et avgrenset, rett eller buet kjegleformet brudd. I litteraturen varierer verdiene fra 60° for svak, tett oppsprukket eller forvitret bergmasse, til 90° for sterke, lite oppsprukkede bergarter. Andre oppgir 80° for bergmasse av moderat kvalitet til 120° for bergmasse av høy kvalitet. I testene rapportert i denne artikkelen varierte verdiene fra omtrent 60° til 80° for friksjonsmaterialene og 100° og 110° for de lavkohesive materialene. Siden testene presentert i denne artikkelen antas å ha lavere styrke enn henholdsvis "lav" og "høy" -beskrivelsene ovenfor, kan det se ut som at litteraturanbefalingene nevnt over kan anses som konservative.

I test C.1 begynner bruddet å initiere før maksimum last er nådd, mens i C.2 starter bruddet ved eller umiddelbart etter maks last. Bruddplanene skapte en mye bredere vinkel enn observert i friksjonsmaterialene. Maksimallastverdiene for de kohesive materialene er høyere enn for friksjonsmaterialene, og betydelig høyere i C.1, som hadde blokker som holdt nede overflaten nær riggsidene. Bruddet forplanter seg godt under de fastklemte blokkene, som kan ha fungert som en ekstern belastning på overflaten. Over den opprinnelige bruddlinjen oppstår det en rekke av nye brudd (se Fig. 14). Dette forårsaker mobilisering av en større del av materialet, som kan forklare noe av den

større maksimumsverdien for denne testen. Interessant nok, for de lavkohesive prøvene ser det ut til at bruddene starter i midten av hver halvdel og forplanter seg på skrått i begge retninger, som vist i Fig. 12 til Fig. 15. Til tross for disse forskjellene til friksjonsmaterialetestene, har trendene for begge last-deformasjonsdiagrammene like faser, men verdiene som hendelsene inntreffer ved er forskjellige.

Når det gjelder de fysiske testene, hadde den numeriske modellen av friksjonsmaterialet, Soil 1, en mye lavere skjærstyrke enn de kohesive materialene. Dette betyr at friksjonsmaterialet raskt gikk inn i en bruddtilstand i den numeriske modellen. Som et resultat av dette får spenningsnivåene på stagsokkelen og i trykkbuen mye lavere verdier enn det som observeres i de kohesive materialene. På den annen side, spenningen i trykkbuene i de lavkohesive testene får høye verdier før skjær- og strekkbrudd som gjør at materialene gir etter, og dermed får en spenningsreduksjon.

Som nevnt, i den numeriske modellen går friksjonsmaterialet raskt inn i et begynnende skjærbrudd. Bevegelse mobiliserer i form av en opp ned kjegle. Dens grenser sammenfalt med sonene med størst indusert spenning og spissen starter fra stagsokkeloverflaten. Dette antas å representere legemet sett i de fysiske testene. Ved liten deformasjon var vinklene til de største tøyingskonturene omtrent likt maksimal friksjonsvinkel - når man ser nærmere sokkelen. Etter ytterligere deformasjon så de ut til å være nærmere residual friksjonsvinkel. Spissen var lokalisert 1,0-1,5 cm fra bunnen, noe som var lavere enn forventet ut fra de fysiske resultatene. Plasseringen av startpunktet for bruddet har sannsynligvis blitt påvirket av de to faste nodene der stagsokkelen krysser bunnen i riggen.

I de lavkohesive materialmodellene ser det ut til at sonene med skjær- og strekkbrudd følger de nedre "grensene" til trykksonene. Dette er ikke overraskende, da denne grensen deler den mobiliserte delen av materialet med økt trykk, og den underliggende delen med mindre bevegelse. Dermed følger skjær- og strekkbrudd denne grensen i en vid vinkel fra et punkt noen centimeter over bunnen. I tilfellet med Rock 1 skapte dette et innledende, stort bruddlegeme. Men pga. avgrensningen i de øverste hjørnene, fortsatte spenningen å øke i dette bruddlegemet også, inntil den tok en form som meget godt representerte det fysiske resultatet. Tilsvarende gikk Rock 2 til brudd som en enkel, bred kjegleform som nådde riggveggene/de vertikale grensene.

En viktig forskjell å kommentere er at for de numeriske modellene forplantet brudd seg tydelig fra punkter på stagsokkelen, mens bruddene først ble synlige fra midten av hver halvdel av materialet i de fysiske testene. Årsaken til dette kan være at materialet simulert i Rock 1 og Rock 2 er helt homogent, og kontakten med grensene er faste, mens materialene C.1 og C.2 i realiteten inneholder f.eks. luftlommer, har ulike mineralkorn og varierende kontakt med stagsokkelen og sideveggene. En annen årsak, eller bidrag, kan være blokkrotasjon på grunn av riggens stivhet og deformasjon i grensesnittet rigg/materiale. Disse og andre faktorer kan kontrollere atferden på mikroskala, som igjen påvirker de observerte resultatene. Generelt stemmer resultatene fra de numeriske modellene godt overens med resultatene fra de fysiske testene. Derfor anses modellene for å representere den fysiske modellen ganske vellykket, til tross for noen mindre variasjoner i plassering av brudd på stagsokkelen og vinkelen til bruddkroppen.

Når det gjelder materialegenskapene i modellen stemmer de fleste parameterne godt overens med egenskapene til de fysiske materialene. Dette gjelder friksjonsvinkelen som ble estimert basert på bruddvinkelen i C.1 og C.2, kohesjonen bestemt ved bruk av friksjonsvinkel og UCS-verdier fra tester. E-modulen ble funnet å ha stor innflytelse på bruddformen og utstrekningen i det lavkohesive materialet. Det var ved å variere denne at man klarte å få modellresultatene til å ligne mest på de fysiske. Den endelige E-modulen ble unaturlig lav, lavere enn for Soil 1. Dette kan ha sammenheng med at modellen oppfører seg stivere enn det den fysiske riggen gjør, i tillegg til at man beveger seg i grenseland for hva koden i RS2 kan få til.

Ser man på Fig. 7, som presenterer sammenhengen mellom belastning, deformasjon og bruddutvikling, kan man analysere denne utviklingen og isolere noen prosesser som senere, med mer kunnskap, kan overføres til ligninger. Om man ser på fase 1 er det en lineær belastning/deformasjon med elastisk oppførsel og spenningsoppbygging i modellen som gir en ren lineær komponent.

Overgangen mellom fase 1 og 2 er mer gradvis for den fuktige eklogitten enn den tørre eklogitten og kan være et resultat av en svært liten forskjell i kohesjon forårsaket av tilsatt vann.

I fase 2 kan flere prosesser pågå samtidig på forskjellige steder i materialet. Som vist i Fig. 5 og Fig. 6 kan den første synlige bevegelsen sees i overgangen til fase 2, mens første synlige brudd er midt i fasen. Så i begynnelsen av dette stadiet kan det skje to prosesser, noe gjenværende elastisk deformasjon, men gradvis mer og mer plastisk deformasjon, inntil bruddinitieringen starter. Videoene viser at plastisk deformasjon forekommer langs hele kjeglen i god tid før bruddinitiering, og dermed ikke noe elastisk lastbidrag på dette tidspunktet. Ettersom man må anta at reststyrken til det materialet som har bruddlinje er langt lavere enn det som kun har gjennomgått plastisk deformasjon, kan man likevel se at belastningen øker en kort stund etter bruddinitiering. Det er derfor sannsynlig at lasten som tas opp i materialet som er i en plastisk bruddtilstand øker fra overflaten og ned mot fronten av linjebryddet, hvor det raskt får økende lastopptak.

Fra punktet med det første synlige plastiske bruddet og til maksimum lastopptak er lastreduksjonen på grunn av bruddlinjeinitiering lavere enn økningen i lastopptaket i området med plastisk deformasjon. Ved maksimum lastopptak bytter dette, og reduksjonen på grunn av voksende bruddlinje er større enn lastopptaket i området med plastisk brudd, og den totale lasten materialet kan ta opp reduseres.

Dermed er den totale lasten som materialet er i stand til å ta opp redusert. Ettersom disse testene er deformasjonsstyrte, får man også lastoppførselen etter maksimum last. Hvis pålastning hadde styrt resultatene, som ved et overbelastet in-situ stag, ville et plutselig uttrekk av stagblokken skje ved maksimallasten, da den ikke ville ha nok kraft til å holde den tilbake.

På grunn av få tester og at bruddet forplantet seg til sideveggene i kammeret, kan ikke samme analyse som ovenfor for de lavkohesive testene gjøres. Imidlertid er de samme bruddprosessene sannsynligvis til stede, men de er vanskelige å tolke når de ikke vises på de utførte testene.

6 Konklusjoner

I studien har brudd i homogene friksjonsmaterialer og lavkohesive materialer under belastningen av et stag blitt vellykket simulert med et lite testapparat. Hovedfunnene var at brudd starter inne i materialet, forplanter seg skrått utover og til slutt vil nå overflaten. Det har form av en opp ned kjegle og plasseringen av kjeglens spiss på staget avhenger av materialet, men er vanligvis innenfor den nederste 1/4 av stagets forankrede lengde. Vinkelen til bruddlegemet varierer generelt innen noen få grader fra materialets maksimale friksjonsvinkel, og er bredere for kohesive materialer enn friksjonsmaterialer. Dessuten er verdiene for maksimal motstand i kohesive materialer høyere enn i friksjonsmaterialer og antas å øke med økt kohesjon. Ved å trekke bruddkjeglens vekt fra den registrerte maksimallasten, har det blitt vist at materialets styrke kan utgjøre opptil 85 % av maksimal motstand mot uttrekk for friksjonsmaterialene, og opptil 98 % i de lavkohesive materialene. Dette taler sterkt for at man bør bruke materialstyrke og ikke bare vekt som bidragsyter til stagkapasitet.

Analysene av last/deformasjon og bruddforhold har for friksjonsmaterialer identifisert to viktige stadier som kan ha betydning for beregning av stagkapasitet. Den første er overgangen fra elastisk oppførsel i fase 1, til plastisk oppførsel i fase 2. I beregninger for denne overgangen er inngangsverdier relativt enkle å gi fra standardiserte laboratorietester for styrke og deformerbarhet. For praktiske formål vil også denne overgangen være et godt mål da man ikke ønsker store deformasjoner i konstruksjonene man bruker stagene til å stabilisere. Den andre er overgangen mellom fase 2 og 3, maksimum last. For å beregne dette, som vil være det samme som å tape staget, trenger man både materialets reststyrke etter brudd og verdier som forklarer bruddutbredelsen, som alle er vanskelige å finne gjennom tester.

For hardere og sprøere materialer, som det lavkohesive materialet i disse testene, og i enda større grad, for fast berg, kan prosessene i hver fase være forskjellige og også relativt nærmere hverandre på deformasjonsaksen. For dype stage kan også mer enn én fase pågå samtidig på forskjellige dybder, noe

som gjør både in-situ spenninger og nylig oppståtte spenninger på grunn av deformasjoner til en viktig faktor for å forstå stagenes bruddforløp.

References

- American society of civil engineers (1966) Rock foundations, vol 16. Technical engineering and design guidelines as adapted from the us army corps of engineers. American society of civil engineers,
- Brown ET (2015) Rock engineering design of post-tensioned anchors for dams – A review. J Rock Mech Geotech Eng 7 (1):1-13. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.08.001>
- Coates DF (1970) Rock Mechanics Principles. Mines Branch, Department of Energy, Mines and Resources,
- Hobst L, Zajíc J (1983) Anchoring in rock and soil, vol 33. Kotvení do hornin, 2nd completely rev. ed. edn. Elsevier, Amsterdam
- Kim H-K, Cho NJ (2012) A design method to incur ductile failure of rock anchors subjected to tensile loads. The electronic journal of geotechnical engineering 17:2737-2746
- Littlejohn GS, Bruce DA (1977) Rock anchors - state of the art. Foundation Publications Ltd., Brentwood, Essex
- Liu J, Liu M, Zhu Z (2012) Sand Deformation around an Uplift Plate Anchor. J Geotech Geoenviron 138 (6):728-737. doi:doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000633
- Ongstad A, Bergh-Christensen J (2010) Anchoring in rock. Paper presented at the Bergmekanikkdagen, Oslo, November 26-26
- Pedersen KB, Knutson Å (2004) Forankring med bergbolter ved fundamentering av støttemurer og landkar på berg. Vegdirektoratet,
- Rocscience Inc. (2020) RS2. 11.002 edn., Toronto
- Statens vegvesen (2018) Geoteknikk i vegbygging. V220. Statens vegvesen, Oslo
- Subramanian N (2008) Design of Steel Structures. Oxford University Press, Oxford
- Wyllie DC (2009) Foundations on rock. 2 edn. E & FN Spon, Abingdon