

Norconsult 

▶ **ROCARC Webinar 2020 – Knowledge Exchange**

Forankringer i berg – FoU og praksis i Norconsult



ROCARC Webinar 2020 – Knowledge Exchange

- ▶ Siv.ing Andreas Ongstad, Norconsult AS

- ▶ **Forankringer i berg – FoU og praksis i Norconsult**
 1. Forankring i berg - Internt FoU-prosjekt i Norconsult 2010-2012
 2. Praksis og metoder benyttet i Norconsult i forhold til beregning av ulike typer forankringer (kabler for hengebruer, stag, bolter og strekkpeler)
 3. Eksempler på tilfeller der de etablerte modellene utfordres – case study



Internprosjekt i Norconsult - FoU Forankring i berg

- ▶ 2010 gjennomførte NO en innsamling og gjennomgang av norske og internasjonale standarder og fagartikler vedrørende forankringer i berg. Resultatene ble presentert på Bergmekanikkdagen i 2010 med konferanseartikkel: *Andreas Ongstad, Jan Bergh-Christensen (2010): "Strekkforankring i berg". Fjellsprenningsteknikk/Bergmekanikk/Geoteknikk 2010.*
- ▶ Det er særlig mekanismene ved forankring i svakt berg, og den begrensede kunnskapen man ofte har om bergkvalitet og bergforhold ved forankring i svakt berg, som ble diskutert og som man så et behov for å undersøke nærmere.
- ▶ Som en oppfølger av dette arbeidet ble det i 2011-12 gjennomført et FOU-prosjekt ved avdeling Ingeniørgeologi med formål å undersøke forankringslengde i svakt berg nærmere.
- ▶ Hovedaktiviteten var uttrekksforsøk på innstøpte bolter i to testområder; ved Norcem /Norbetong`s anlegg på Slemmestad, samt i utslippstunnelen for Midgardsormen ved Bekkelaget. Forsøkene var vellykkede, og ga overraskende, men entydige resultater. Resultatene ble presentert på Bergmekanikkdagen i 2012 med konferanseartikkel: *Jan Bergh-Christensen og Andreas Ongstad (2012): «Uttrekkforsøk på innstøpte bolter i alunskifer». Fjellsprenningsteknikk/Bergmekanikk/Ingeniørgeologi 2012.*

Lokalitet og bergforhold

- ▶ NorBetong og Norcems blandeverksområde på Slemmestad
- ▶ Alunskifer med store, tydelig definerte kalkknoller, noe foldet.
- ▶ Kalkknollene er nokså lite oppsprukne
- ▶ Alunskiferen tett skifrig til sukkerbitaktig
- ▶ Lagdelingen mest definerte sprekeretning N258-270°Ø/20°NV



Gjennomføring av forsøkene

- ▶ Boring av 2,2 m lange hull med knemater, 51 mm borkrone
- ▶ Gysing av Ø25 mm kamstålbolter med Weber boltemørtel. Det ble brukt enkel stempelpumpe med tilsiktet innstøpningslengde 1,0 m.
- ▶ Bolter påmontert forlengerenhet, elefantfot og metallskive, og prøvetrukket ved bruk av Enerpac RACH-306, kapasitet 30 tonn.
- ▶ Lastavlesning på manometer, omregning med krafttabell. Avlesning av jekkstempelets bevegelse relativt til jekksylinderen



Tekniske data

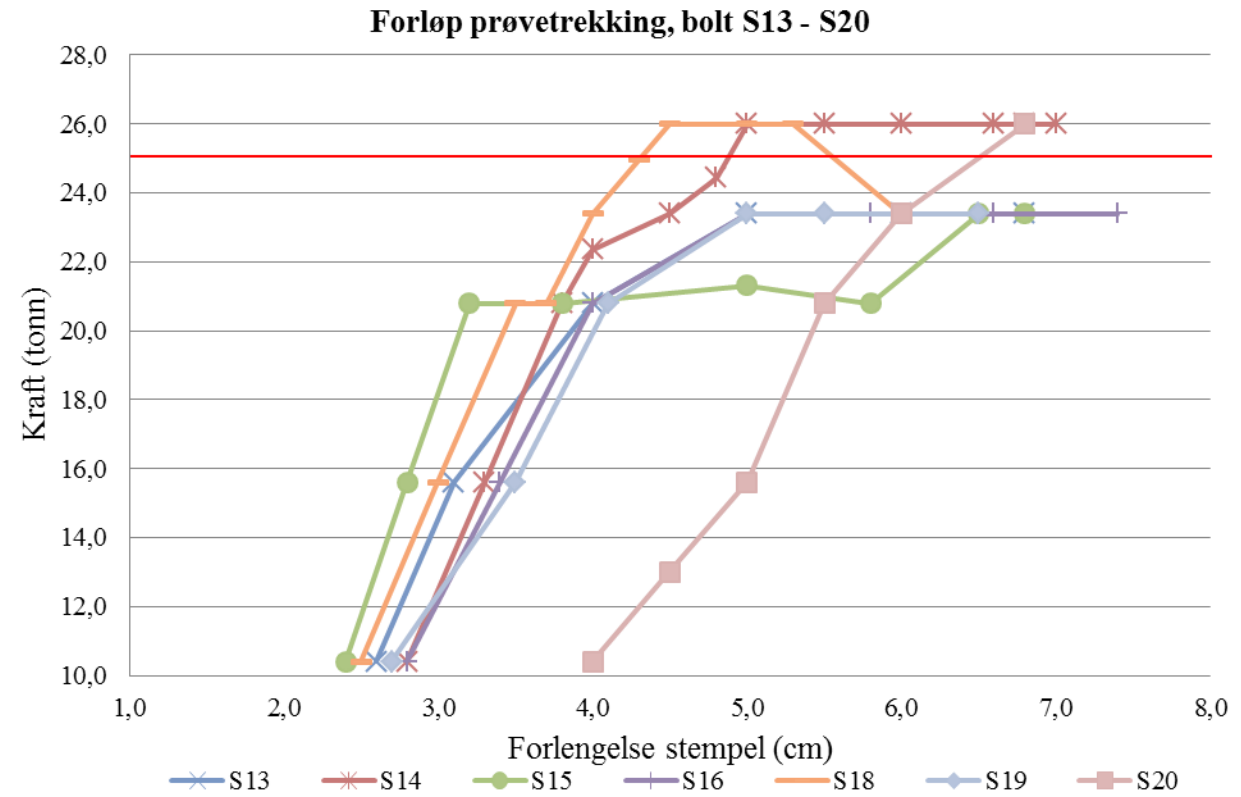
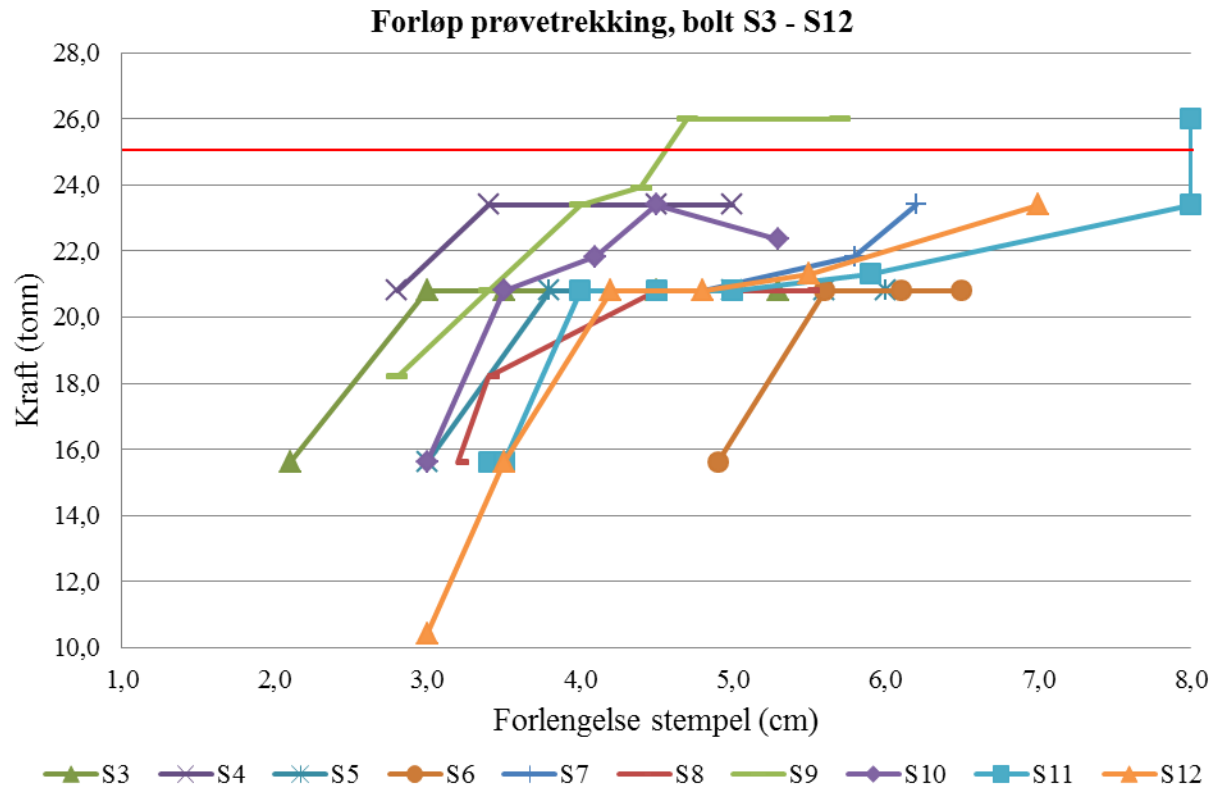
Enhet	Stål	Tverrsnitt	Flytegrense	Bruddgrense	Flytelast	Bruddlast
		mm ²	N/mm ²	mm ²	tonn	tonn
Boltestamme	B500NC	491	500	600 - 650	25	30 - 32
Gjengeparti bolt		353			18	21,5 - 23
Forlengerenhet	8,8	349	640	800	23	28



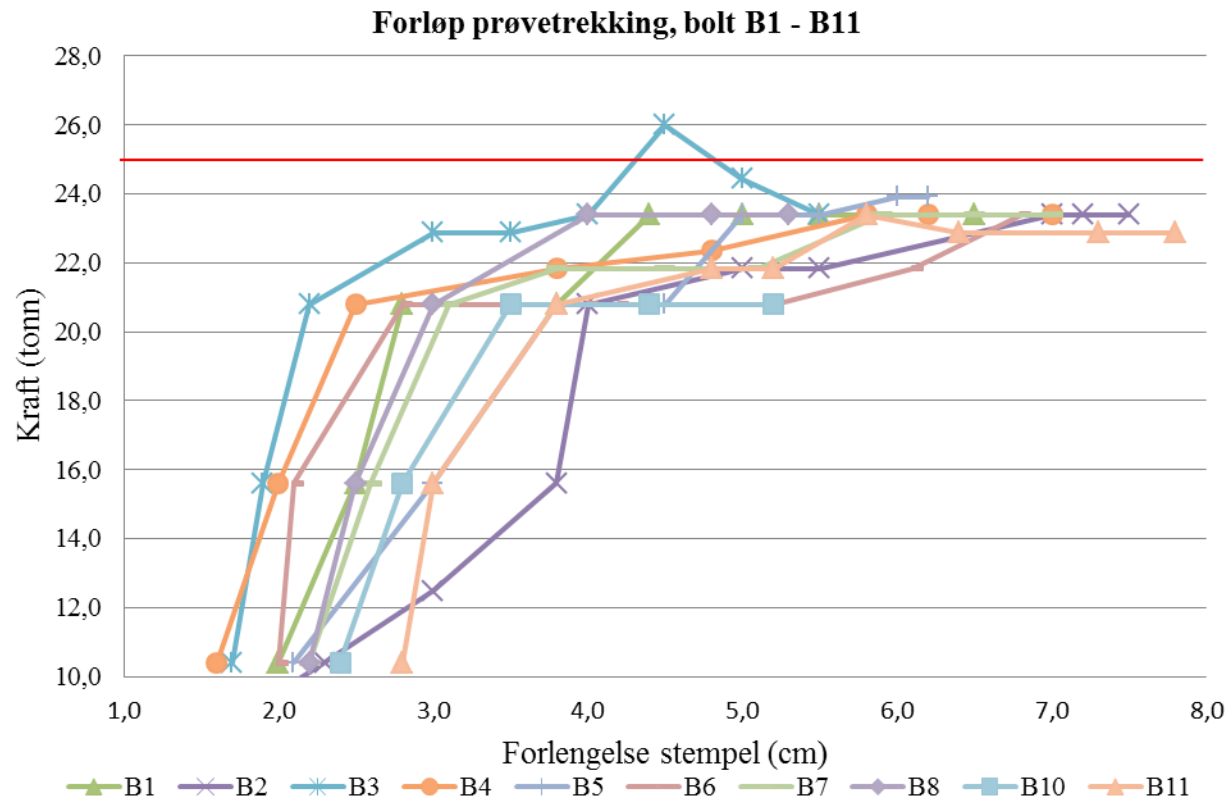
Pretec M24x2400 med avstandsholdere i hver ende, bolteskive, mutter

→ Ved boltelast 25 tonn lite sannsynlig at kombinasjonen av elastisk tøyning og flytning i bolt og forlengerenhet til sammen gir en tøyning på mer enn ca. 20 mm.

Forløp prøvetrekking – felt S

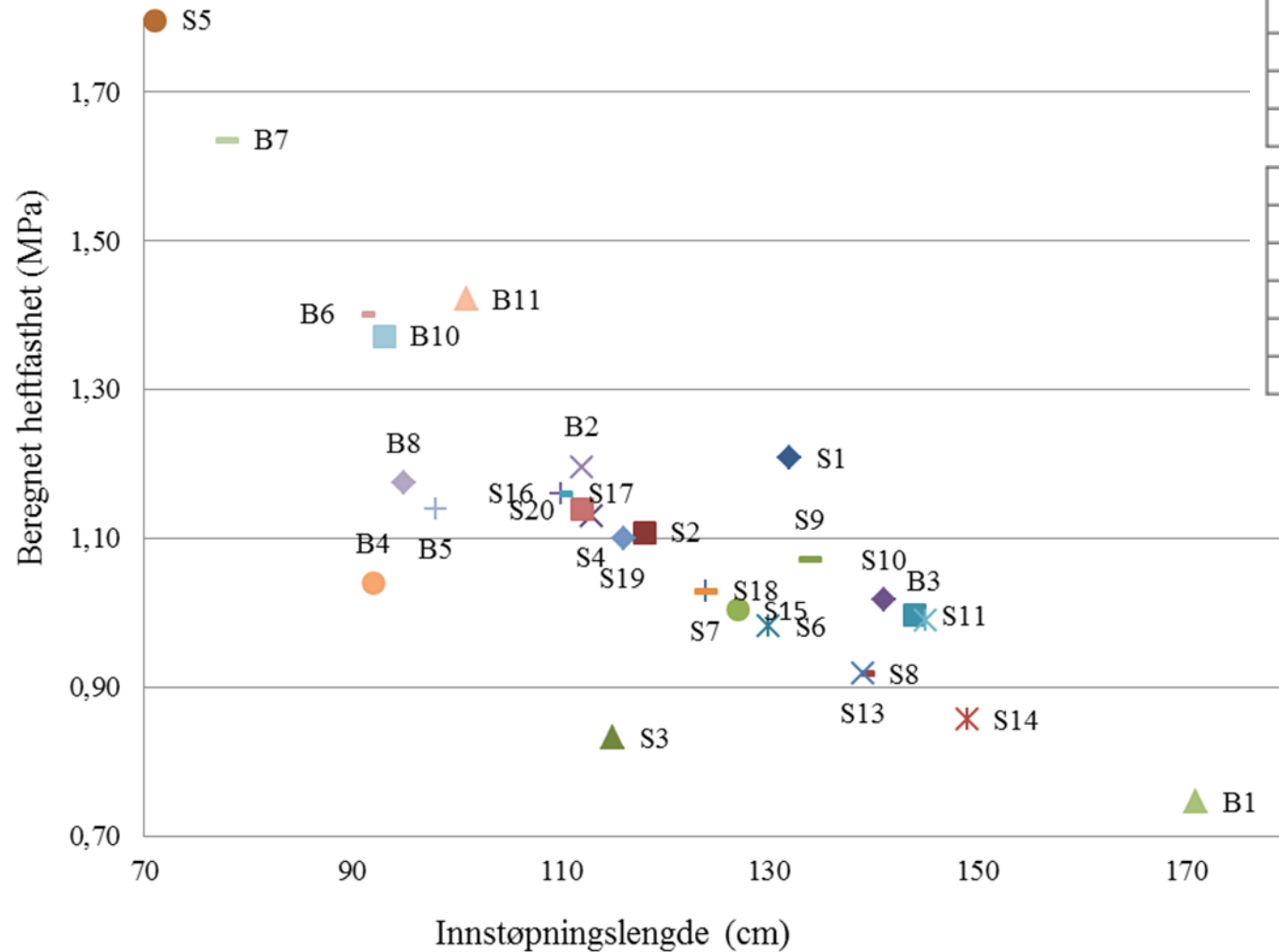


Forløp prøvetrekking – felt B



Resultater

Beregnet heftfasthet, alle bolter

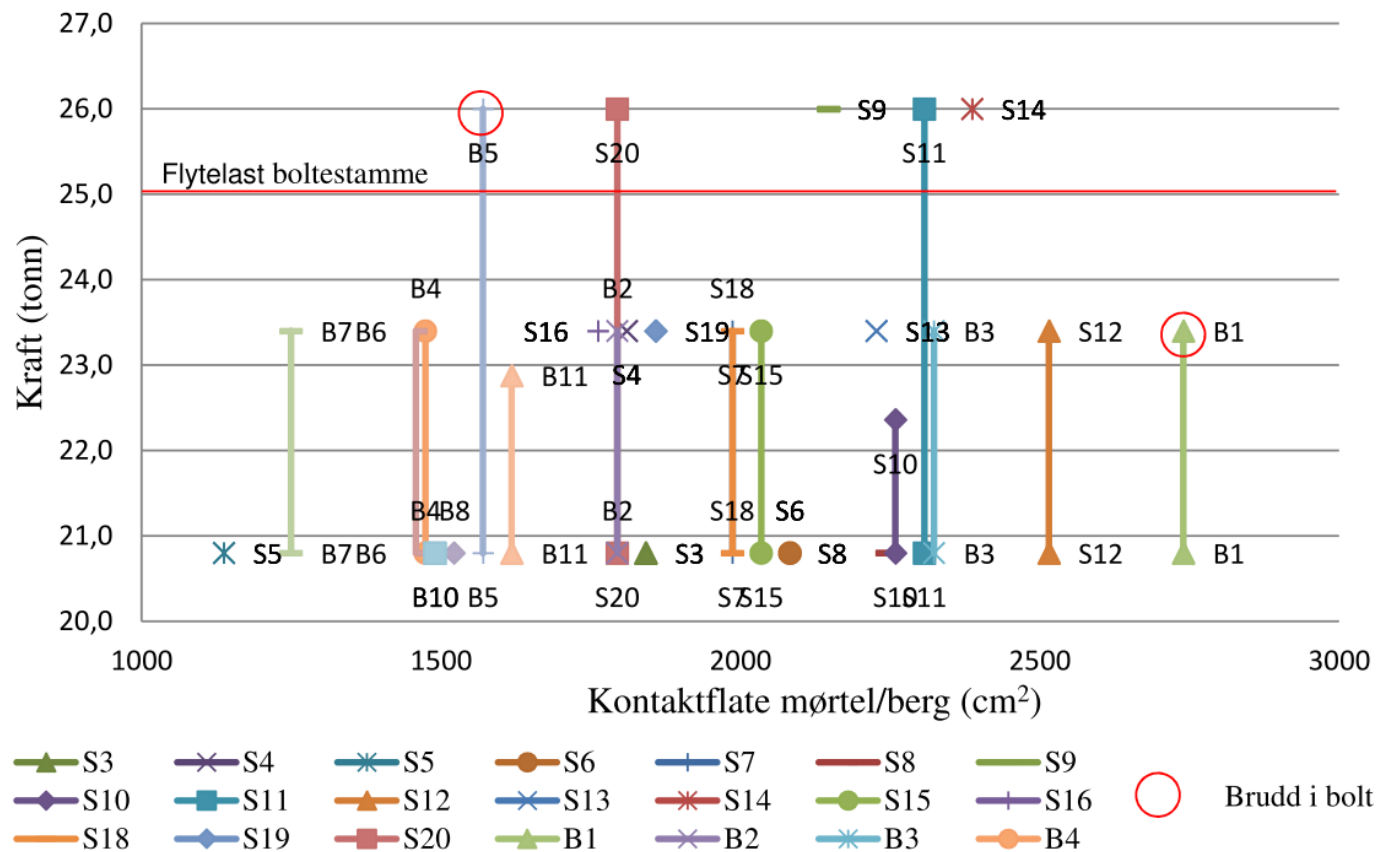


Prøve-ID		S-P1	S-P2	S-P3
Mørtelblanding		Skjæring ved adkomstvei		
Terningstørrelse (L, B, H)	mm	70	70	70
Densitet	kg/m ³	1880	1880	1880
Maksimal last	kN	130,0	129,5	134,4
Trykkfasthet	MPa	26,1	26,4	27,5

Prøve-ID		B-P1	B-P2	B-P3
Mørtelblanding		Skjæring i blandeverksområde		
Terningstørrelse (L, B, H)	mm	70	70	70
Densitet	kg/m ³	1910	1910	1910
Maksimal last	kN	145,2	156,3	153,5
Trykkfasthet	MPa	29,7	31,9	31,4

Resultater

Sviktlast, sluttlast



Tabell 2: Resultater fra prøvetrekking

Bolt	Innstøpt lengde	Innstøpt overflate		Initiallast (startende svikt)		Beregnet initial heftspenning (startende svikt)		Avsluttende strekkraft		Beregnet avsluttende heftspenning (stopp trekking)	
		$A_{mørtel/berg}$	$A_{mørtel/stål}$	F_{d1}	F_{d2}	$\tau_{d, mørtel/berg}$	$\tau_{d, mørtel/stål}$	F_{d1}	F_{d2}	$\tau_{d, mørtel/berg}$	$\tau_{d, mørtel/stål}$
nr.	L_d	cm ²	cm ²	kN	tonn	MPa	MPa	kN	tonn	MPa	MPa
S1	1,32	2115	1037	-	-	-	-	256	26,0	1,21	2,46
S2	1,18	1891	927	-	-	-	-	210	21,3	1,11	2,26
S3	1,15	1843	903	204	20,8	1,11	2,26	204	20,8	1,11	2,26
S4	1,13	1810	887	230	23,4	1,27	2,59	230	23,4	1,27	2,59
S5	0,71	1138	558	204	20,8	1,80	3,67	204	20,8	1,80	3,67
S6	1,30	2083	1021	204	20,8	0,98	2,00	204	20,8	0,98	2,00
S7	1,24	1987	974	204	20,8	1,03	2,10	230	23,4	1,16	2,36
S8	1,39	2227	1092	204	20,8	0,92	1,87	204	20,8	0,92	1,87
S9	1,34	2147	1052	256	26,0	1,19	2,43	256	26,0	1,19	2,43
S10	1,41	2259	1107	204	20,8	0,90	1,85	220	22,4	0,97	1,98
S11	1,44	2307	1131	204	20,8	0,89	1,81	256	26,0	1,11	2,26
S12	1,57	2515	1233	204	20,8	0,81	1,66	230	23,4	0,91	1,86
S13	1,39	2227	1092	230	23,4	1,03	2,11	230	23,4	1,03	2,11
S14	1,49	2387	1170	256	26,0	1,07	2,18	256	26,0	1,07	2,18
S15	1,27	2035	997	204	20,8	1,00	2,05	230	23,4	1,13	2,31
S16	1,10	1762	864	230	23,4	1,30	2,66	230	23,4	1,30	2,66
S17	1,21	1939	950	-	-	-	-	179	18,2	0,92	1,88
S18	1,24	1987	974	204	20,8	1,03	2,10	230	23,4	1,16	2,36
S19	1,16	1859	911	230	23,4	1,24	2,52	230	23,4	1,24	2,52
S20	1,12	1794	880	204	20,8	1,14	2,32	256	26,0	1,42	2,90
B1	1,71	2740	1343	204	20,8	0,75	1,52	230	23,4	0,84	1,71
B2	1,12	1794	880	204	20,8	1,14	2,32	230	23,4	1,28	2,61
B3	1,45	2323	1139	204	20,8	0,88	1,79	230	23,4	0,99	2,02
B4	0,92	1474	723	204	20,8	1,39	2,83	230	23,4	1,56	3,18
B5	0,98	1570	770	204	20,8	1,30	2,66	256	26,0	1,63	3,32
B6	0,91	1458	715	204	20,8	1,40	2,86	230	23,4	1,58	3,22
B7	0,78	1250	613	204	20,8	1,64	3,34	230	23,4	1,84	3,75
B8	0,95	1522	746	204	20,8	1,34	2,74	230	23,4	1,51	3,08
B10	0,93	1490	730	204	20,8	1,37	2,80	204	20,8	1,37	2,80
B11	1,01	1618	793	204	20,8	1,26	2,58	225	22,9	1,39	2,83

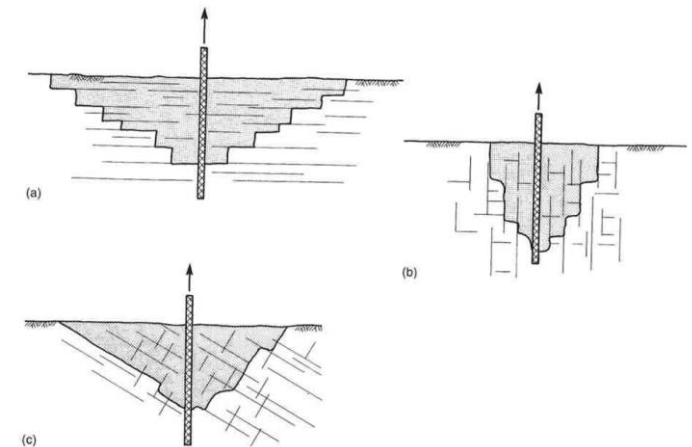
Rød merking: Ved trekking oppstod det brudd i boltens gjengede del

Konklusjoner prøvetrekkingsforsøk Slemmestad

- ▶ Det ble ikke funnet noen signifikant variasjon av lastkapasiteten som funksjon av innstøpningslengden innen det testede intervallet 0,71 – 1,71 m.
- ▶ Forklaringen ligger trolig her i den spesielle bruddmekanismen (de-bonding) som er beskrevet internasjonalt for lignende forsøk i svake bergarter.
- ▶ Tydelig svikt-nivå på 21 tonn, og at mange av boltene etter svikt i forankringen kunne trekkes videre til ca. 23 tonn, og enkelte videre til 26 tonn.
- ▶ Forsøkene ble gjort på kamstålbolter som ble trukket nær opptil, og for noen bolter over, bruddlast. Det ville vært interessant å gjort forsøk på stivere forankringer med langt høyere kapasitet, og ved økt prøvelast.
- ▶ Forsøkene ga ikke noen sikre holdepunkter for hvilke skalaeffekter som kan gjøre seg gjeldende ved hulldiameterer som er aktuelle for stagforankringer og stålkjernerpeleler.
- ▶ Det ble ikke gjort utboring av prøvetrukkede bolter – dette ville vært interessant for å gjøre en nærmere vurdering av bruddutvikningen rundt boltene

Praksis og metoder ved beregning av ulike typer forankringer

- ▶ Passiv eller aktiv forankring?
- ▶ Styrende dokumenter for prosjektering?
- ▶ Geologi:
 - Bergartstype, bergartsstyrke
 - Bergmassens detaljoppsprekning, blokkstørrelse
 - Sprekkeretninger, sprekkeavstand, utholdenhet sprekker, sprekkebelegg
 - Slepper – orientering, mektighet, sleppemateriale
 - Sprekkeutholdenhet
 - Grunnvannstand
 - Løsmasseoverdekning



Dimensjonering av strekkforankringer

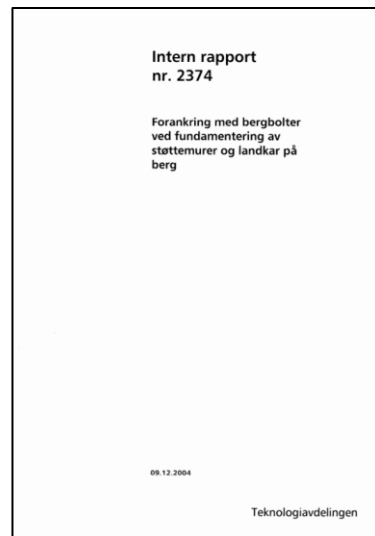
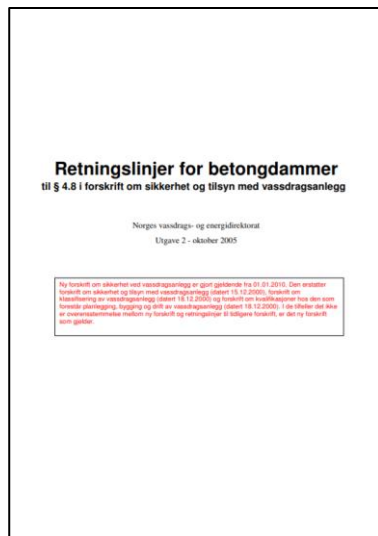
- ▶ Kapasitet til stag/pel/bolt
- ▶ Forankringslengde
 - Tilstrekkelig for å unngå utrivning av forankringen
 - Heft stål/mørtel og mørtel/berg større enn dimensjonerende strekkbelastning
- ▶ Forankringsdybde
 - Tilstrekkelig mothold for å unngå utrivning av bergmassen
- ▶ Heftfaktorer mørtel-berg:
 - Bergartstype og bergartsstyrke
 - Ruhet på borehullsveggen
 - Mørtel / berg: Hva er det svakeste leddet?

} Tabellverk, egne erfaringstall

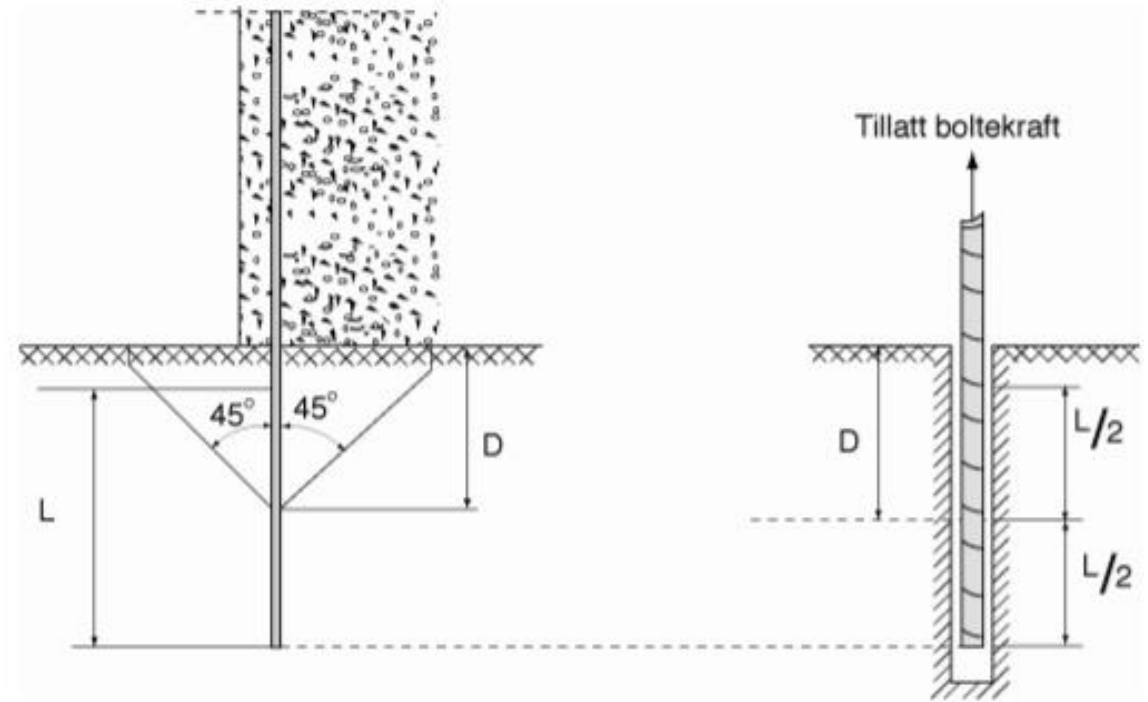
Bergart	Tyngdetetthet (kN/m ³)	Heftstyrke til mørtel (kN/m ²)
Granitt	26	2000
Gabbro	28	2500
Gneis	26	1500
Sandstein	27	1200
Kalkstein	24	2000
Leirskifer	28	500
Kvartsitt	25	2500

Forankring med bolter

- ▶ Vekt av berg-modellen
 - NVE - Retningslinjer for betongdammer
 - SVV - Intern rapport nr. 2374
- ▶ Kjeglespiss på uttrekslegeme midt på forankringslengden

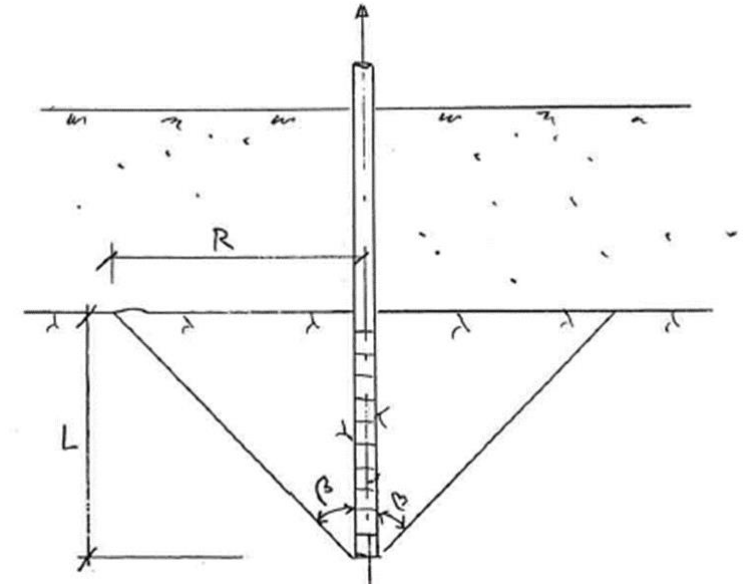
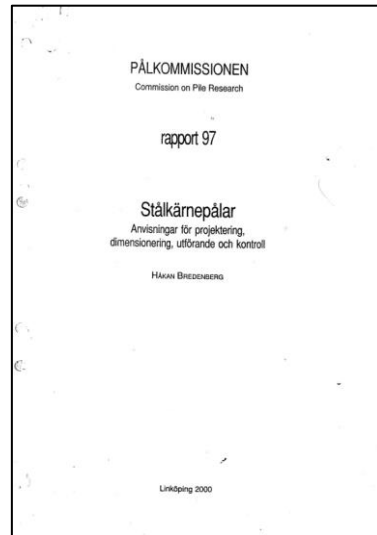


- ▶ Andre tilnærminger for bestemmelse av forankringslengde:
 - ▶ Tommelfingerregler?
 - ▶ Erfaringstall?
 - ▶ Analog modell - Skjærkraft i støpeskjøt



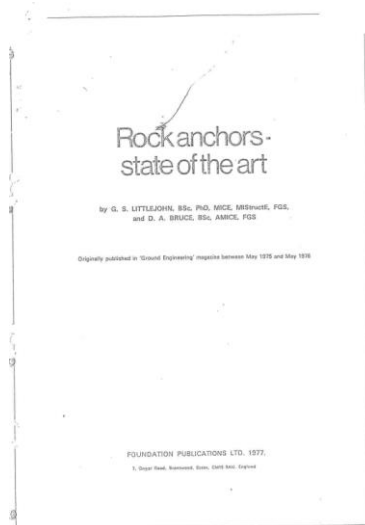
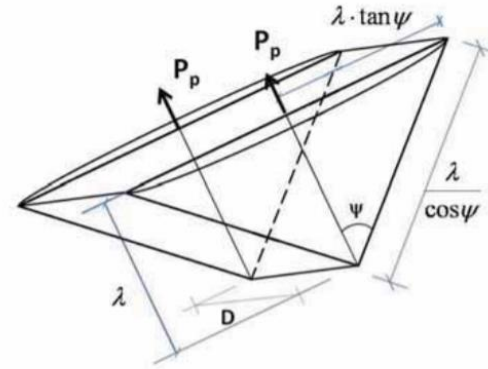
Forankring med strekkpeler

- ▶ Vekt av berg-modellen
 - ▶ NGF - Peleveiledningen 2018
 - ▶ Pålkommisjonen - Stålkärnepålar
- ▶ Kjeglespiss på uttrekslegeme i bunn av forankringslengden
- ▶ Medregning av vekt løsmasser



Forankring med stag i berg

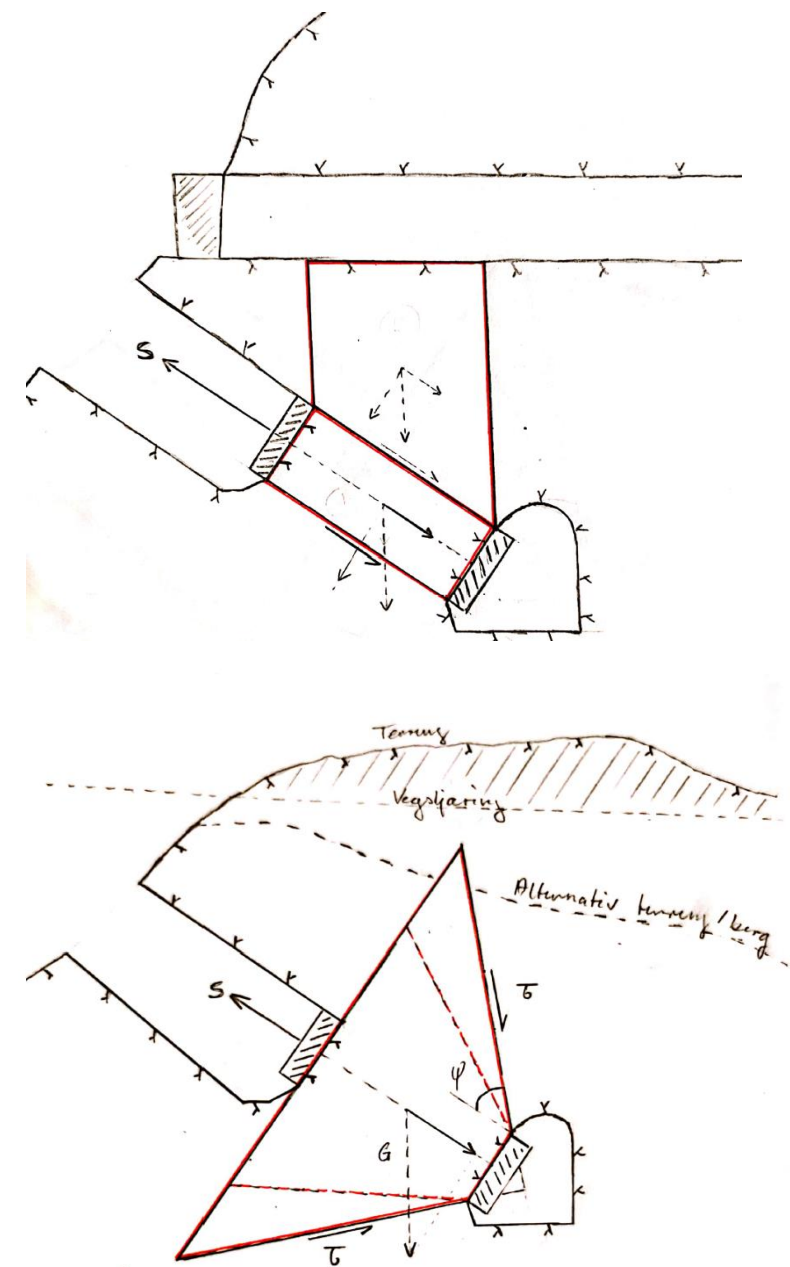
- ▶ Vekt av berg-modellen
 - Littlejohn & Bruce - Rock anchors - state of the art
- ▶ Heft på bergoverflate-modellen
 - SVV - V220 Geoteknikk i vegbygging
- ▶ Kjeglespiss på uttrekslegeme vanligvis i bunn av forankringslengden



Beskrivelse av bergart	Heftfasthet på bruddplan τ_k kPa	Bruddvinkel ψ^0
Meget godt berg, ett sprekkesett med sporadiske sprekker, bergmassens trykkstyrke > 50 MPa.	100 -200	$\psi_{maks} \leq 45^0$
Bergmasser med to sprekkesett og sporadiske sprekker, bergmassens trykkstyrke 15 – 50 MPa	50 - 100	$\psi_{maks} \leq 40^0$
Tre sprekkesett med sporadiske sprekker, men mindre enn 20 sprekker pr. m ² , bergmassens trykkstyrke < 15 MPa.	50	$\psi_{maks} \leq 30^0$
Ved sterkt oppsprukket berg bør sementinjeksjon i bergmassen vurderes		

Forankring av hengebruer

- ▶ Blokkmodell som hensyntar vekt og friksjon iht. N400
 - ▶ Friksjonskoeffisient $\mu = 1.0$
 - ▶ Tyngdeblokk og friksjonsblokk (tyngdeblokk tilpasses terreng eller veg-/tunnelgeometri)
 - ▶ Materialfaktor $\gamma_m = 1.4$
- ▶ Kjeglemodell som hensyntar vekt og hefffasthet (kontroll)
 - ▶ Valg av bruddvinkel og hefffasthet iht. V220 – uttrekking av bergvolum
 - ▶ Dekomponerer vekt og hefffasthet i retning av stagkraft
 - ▶ Materialfaktor for hefffasthet iht. V220 ($\gamma_m = 2.0$ el. 3.0 avh. av kjennskap til bergforhold)
 - ▶ Lastfaktor for vekt $\gamma_G = 0.9$
 - ▶ **NB!** Avstandskontroll (to kabelplan) + kontroll av terreng eller veg-/tunnelgeometri
- ▶ Hensyn til vanntrykk
 - ▶ Blokkmodell – Normaltilstand forutsetter drenerte bergrom (trekanttrykk på bruddplan)
 - ▶ Blokkmodell – Ulykkestilstand forutsetter fullt mobilisert vanntrykk i forankringskammer
 - ▶ Kjeglemodell – neddykket vekt (lite grunnlag for å kvantifisere reduksjon av hefffasthet?)
- ▶ Mulighet - tilpasning til sprekkeorientering
 - ▶ Sprekkeorientering som grunnlag for å definere geometri for blokkmodell



Eksempler på tilfeller der de etablerte modellene utfordres

- ▶ Forankringer i tunnel, f.eks. bolter for oppheng av drypphvelv:
 - Fast innboringslengde i godt/stabilitetssikret berg
 - Vurderinger knyttet til forankringslengde og forankringsdybde?
 - Medvirkende bidrag fra bergsikring og innspenning (hvelvvirkning)
 - Mulighet for visuell vurdering av berget, evt. prøving av bolter/kontroll av oppnådd forankring

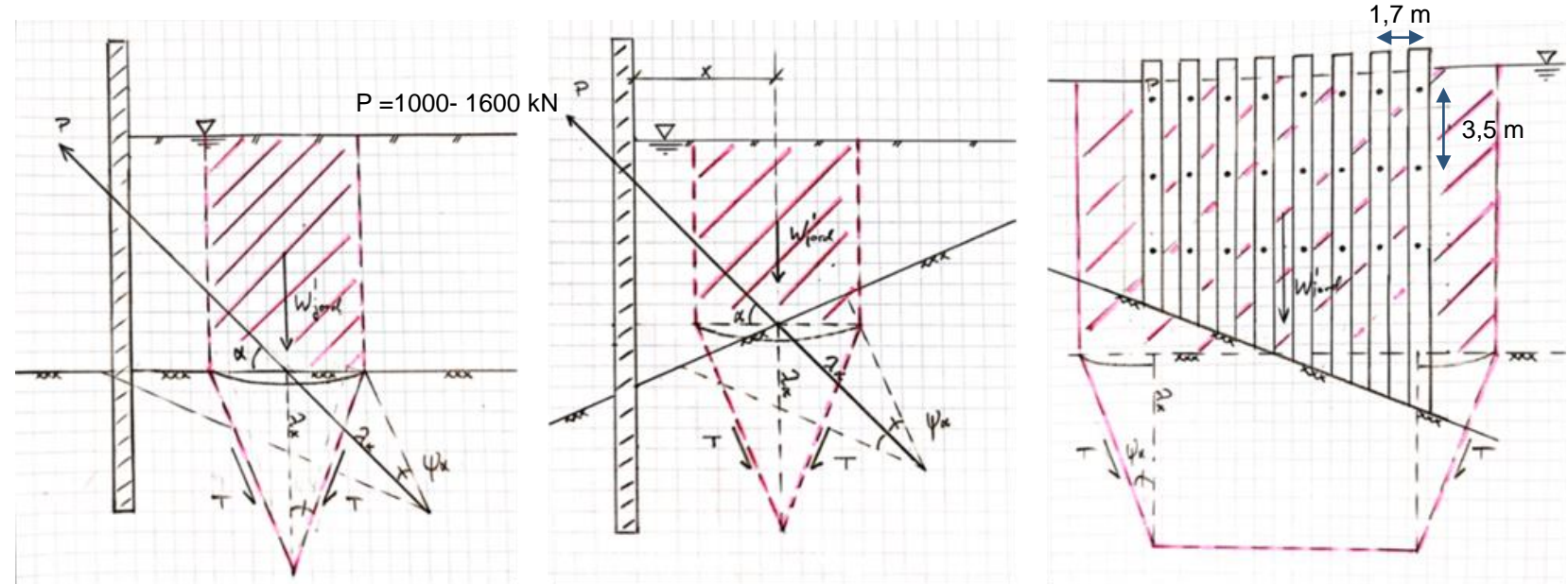
- ▶ Vekt-av-berg modellen
 - Baserer seg på forankringer satt vertikalt rett nedover
 - For forankringer satt på skrått eller horisontalt – Dekomponere vektbidrag, regne med sprekkefriksjon?
 - Logisk brist når forankringer settes vertikalt oppover

- ▶ Samvirke mellom mange stagrekker
 - Ekstreme innboringslengder ved beregning av forankringsdybde ved samvirke mellom stag i mange rader
 - Dimensjonerende last eller prøvelast ved beregning av forankringsdybde for stagrekker?
 - Hva er realistisk samvirkemodell?

Eksempel på tilfelle der de etablerte modellene utfordres – case study

Uttrekking av berg:

- Lange innboringslengder ved beregning av samvirke mellom stag i rekke (spunt/pelevegg) (15-20 m).
- Ingen prosedyre for samvirke mellom flere stagerrekker - superponering av krefter/stagerrekker gir enda mer ekstreme forankringslengder (> 20 m).
- Behandler én og én stagerække – inkluderer neddykket jordvekt basert på tilgjengelig bergmodell (tilnærming) – i tillegg til heftfasthet iht. V220. Vekt av berg neglisjeres for å ta høyde for usikkerhet i metoden.
- Asymmetriske kjegler grunnet skjev angrepsvinkel har ikke analytisk løsning for heftoverflate – kompenserer ved å redusere bruddvinkel (iht. V220)
- Alle stabiliserende krefter dekomponeres i stageretningen.
- Prosjekterte innboringslengder i størrelsesorden 5-11 m (varierte fra oppriss til oppriss og stagerække til stagerække).



Brudd i grensesnittene mørtel-berg / stål-mørtel

- Karakteristisk heftfasthet mellom mørtel og berg lik 2,0 MPa ble benyttet. Maksimal beregnet innstøpingslengde lik 4,2 m (enkelsttag).
- Maksimal beregning innstøpingslengde styrt av brudd i grensesnittet stål-mørtel lik 6,7 m.
- Maksimal beregnet innstøpingslengde ved bruk av karakteristisk heftfasthet 0,5 MPa (tabellverdi for leirskifer) lik 16,7 m (enkelsttag).



Vår kunnskap bidrar til et mer verdifullt samfunn