

R-00-42

Hållfasthetsberäkningar för en bentonitbuffert bestående av enaxligt kompakterade bentonitkroppar

Pal Kalbantner
ÅF-Energikonsult Stockholm AB

Lars-Erik Johannesson
CLAY Technology AB

November 2000

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co
Box 5864
SE-102 40 Stockholm Sweden
Tel 08-459 84 00
+46 8 459 84 00
Fax 08-661 57 19
+46 8 661 57 19



Hållfasthetsberäkningar för en bentonitbuffert bestående av enaxligt kompakterade bentonitkroppar

Pal Kalbantner
ÅF-Energikonsult Stockholm AB

Lars-Erik Johannesson
CLAY Technology AB

November 2000

Nyckelord: Bentonitbuffert, hållfasthetstester av bentonitprovkroppar, hållfasthetsberäkning för bentonitbuffert.

Denna rapport har gjorts på uppdrag av SKB. Slutsatser och framförda åsikter i rapporten är författarens(nas) egna och behöver nödvändigtvis inte sammanfalla med SKB:s.

Förord

Föreliggande rapport presenterar resultaten från böjhållfasthetstester, utförda på små provstavar av kompakterad bentonit, samt hållfasthetsberäkningar genom FEM-modellering av ett realistiskt lastfall för bentonitbuffert i ett deponeringshål.

Genomförande av hållfasthetsberäkningar för bentonitbufferten kräver förutom tillgång till bentonitens böjhållfasthet även uppgifter om den kompakterade bentonitens tvärkontraktionstal och elasticitetsmodul. Dessa uppgifter finns inte tillgängliga i litteraturen utan har bestämts genom försök inom ramen för detta projekt.

Sammanfattning

Rapporten redovisar följande arbetsinsatser:

- fyrapunktsböjtester med små provstavar uttagna ur en enaxligt kompakterad bentonitring i full skala. Fyrapunktsböjtesterna är utförda av Svenska Keramikinstitutet (SCI) under september/oktober 1999. Denna testserie är den första med fyrapunktsböjtester i det aktuella sammanhanget. Alla tidigare utförda böjtester har varit trepunktsböjtester,
- bestämning av tvärkontraktionstal och elasticitetsmodul för kompakterad bentonit,
- FEM-modellering av det nedersta bentonitblockets påkänningar i en vertikal buffert. Blocket antas vara kupigt, det vill säga inte plant och belastningen sker successivt i överensstämmelse med buffertkomponenternas inplacering i ett vertikalt deponeringshål.

Resultatet av fyrapunktsböjtester kan sammanfattas enligt nedan:

- den genomsnittliga brottspänningsnivån är 2,4 MPa,
- standardavvikelsen för brottspänning är 0,8 MPa,
- den genomsnittliga töjningen vid brott 0,6 %,
- standardavvikelsen för töjning är 0,4 %,
- brottspänningsnivån är betydligt lägre för provstavar tagna från moderkroppens nedre del.

Utöver identifieringen av dessa kvantitativa hållfasthetsuppgifter från fyrapunktsböjtester görs en jämförelse med resultatet från de senast utförda trepunktsböjtesterna utförda av CLAY Technology AB (CTA) under 1999. Jämförelsen utföll med följande resultat:

- den genomsnittliga brottspänningsnivån är ca 10 % högre hos fyrapunktsböjtest,
- moderkroppens nedre del utpekades inte med trepunktsböjtester som svag del i moderkroppen,
- hållfasthetsvärdets standardavvikelse hos fyrapunktsböjtest är mycket större än hos trepunktsböjtest men provomfattningen är för liten för säkra statistiska slutsatser.

Genomförda tester gav underlag för bestämning av tvärkontraktionstal (ν) och elasticitetsmodul (E). För beräkningarna användes $\nu = 0,21$ och $E = 321,7$ MPa.

FEM-modellering av ovan beskrivet lastfall gav följande resultat:

- risk för brott i det nedersta blocket ökar som väntat med ökande formfel,
- den högsta dragbrottsstressen vid statisk belastning i ett felfritt bentonitblock ligger något under materialets brottgräns,
- den högsta tryckbrottsstressen vid statisk belastning i ett felfritt bentonitblock är ungefär 1/2–1/3 av materialets brottgräns.

Innehållsförteckning

	sida
1 Bakgrund och syfte	9
2 Fyrpunktsböjtester	11
2.1 Testrigger	12
2.2 Provtavlar	14
2.3 Resultat	15
2.4 Analys	16
2.4.1 Böjhållfasthet	16
2.4.2 Töjning	17
2.4.3 Statistik	20
3 Trepunktsböjtester	21
3.1 Test	22
3.2 Provtavlar	22
3.3 Resultat	23
3.3.1 Statistik	26
4 Jämförelse	27
4.1 Hållfasthet	27
4.2 Töjning	27
4.3 Konsekvenser	28
5 FEM-modellering	29
5.1 Resultat	30
5.2 Analys	30
5.2.1 Allmänt	30
5.2.2 Tolkning av erhållna resultat	30
6 Referenser	37
Bilagor:	
Bilaga 1: Fyrpunktsböjtest – Primärdata för de provkroppar som använts i fyrpunktsböjtesterna	Bilaga 1:1
Bilaga 2: Fyrpunktsböjtest – Resultat av fyrpunktsböjtester med spännings-töjningskurvor	Bilaga 2:1
Bilaga 3: Trepunktsböjtest. Lokalisering av provkroppar	Bilaga 3:1
Bilaga 4: Trepunktsböjtest. Primärdata för de provkroppar som använts i trepunktsböjtesterna	Bilaga 4:1
Bilaga 5: Bestämning av tvärkontraktionstalet och elasticitetsmodul hos kompakterade bentonitblock	Bilaga 5:1
Bilaga 6: Hållfasthetsberäkning för bentonitblock med planhetsfel	Bilaga 6:1
Referenser	Ref bilagor:1

1 Bakgrund och syfte

I Svensk Kärnbränslehantering AB:s (SKB:s) referenssystem för slutförvaring av använt kärnbränsle ingår bentonitbufferten som en av barriärerna. Bufferten ska byggas upp av block av lämplig storlek och form som tillverkas ur pulverformig bentonit.

Tillverkning av block består av ett antal processteg. I det första steget av tillverkningsprocessen (fram till pressningen) kan materialet karakteriseras som ”bulk”-material, medan det i den andra delen utgörs av ”produktindivider” (block, ring).

Det är viktigt att dessa ”produktindivider” under tillverkningsprocessen inte utsätts för mekaniska påfrestningar av en sådan storlek att dessa skulle innebära några *påtagliga risker* för nedsättning av säkerhet mot brott eller nedsättning av säkerhet för funktion vid normal användning.

För att kunna förutsäga de risknivåer som uppkommer i samverkan mellan lasteffekter (orsakad av hanteringsoperation(er)) och bärförmåga (produktindividens materialegenskap) bör dessa två faktorer (lasteffekt, bärförmåga) kunna identifieras med nöjaktig klarhet.

Föreliggande rapport är avsedd att bidra till kartläggningen av produktindividernas materialegenskaper.

Detta bidrag lämnas dels i form av en jämförelse mellan de tidigare relativt frekvent utförda trepunktsböjtesterna och det för första gången utförda fyrapunktsböjtestet, dels i form av FEM-analys av påkänningen på det nedersta blocket i en färdigbyggd buffert.

I ett vidare perspektiv är syftet dels att fokusera uppmärksamheten på den hållfasthetsnedsättande effekten av förekommande materiella felaktigheter och ofullständigheter i den kompakterade bentoniten, dels att vidga valmöjligheten för en lämplig testmetod som ger ökad säkerhet för hållfasthetsmässig prognostisering.

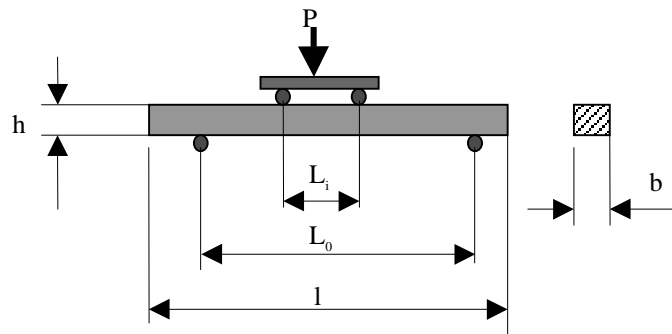
Syftet med FEM-modelleringen är att kontrollera det axiella och radiella hållfasthetsmässiga tillståndet i globalt avseende hos det nedersta blocket i en färdigbyggd stapel även belastas med en 25 ton tung kopparkapsel.

Avslutningsvis kommer fyrapunktsböjtestets resultat att kombineras med tolkningen av FEM-modelleringens resultat.

2 Fyrpunktsböjtester

Vid ett fyrpunktsböjtest påförs de aktiva och reaktiva krafterna provkroppen parvis i fyra punkter: 2 st angreppspunkter och 2 st stödpunkter.

Principuppställningen för ett fyrpunktsböjtest visas i figur 2-1 nedan.



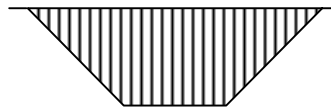
Figur 2-1. Fyrpunktsböjtest – principuppställning.

Böjhållfasthetstestets generella egenskaper, oberoende om det är tre- eller fyrpunktsböjtest, är följande:

1. Endast små volymer material (nära ytskiktet) berörs av maximal spänning.
2. Spänningsfördelningen i tvärsnittet är olikformig.
3. Spänningsnivån är beroende av såväl tvärsnittets form som dess orientering.
4. Testet är känsligt för det sätt på vilket belastningen anbringas (angreppspunkt(er)/stödpunkter).
5. Testutrustningen är enkel.
6. Friktion uppkommer vid stödpunkter.
7. Förhöjd deformation uppkommer vid belastningspunkter.

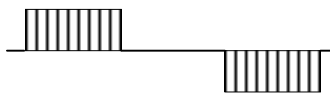
Fyrpunktsböjtestets specifika egenskaper:

1. Fördelningen av maximalt böjmoment respektive dragspänning är trapetsformig (se figur 2-2).



Figur 2-2. Momentdiagrammets form vid fyrpunktsböjhållfasthetstest.

2. Mellan angreppspunkterna är det endast moment utan skjuvkrafter som belastar provkroppen (se figur 2-3).



Figur 2-3. Tvärkraftsdiagrammets form vid fyrpunktsböjhållfasthetstest.

3. Hög(re) känslighet för yt- och volymdefekter.

2.1 Testriggen

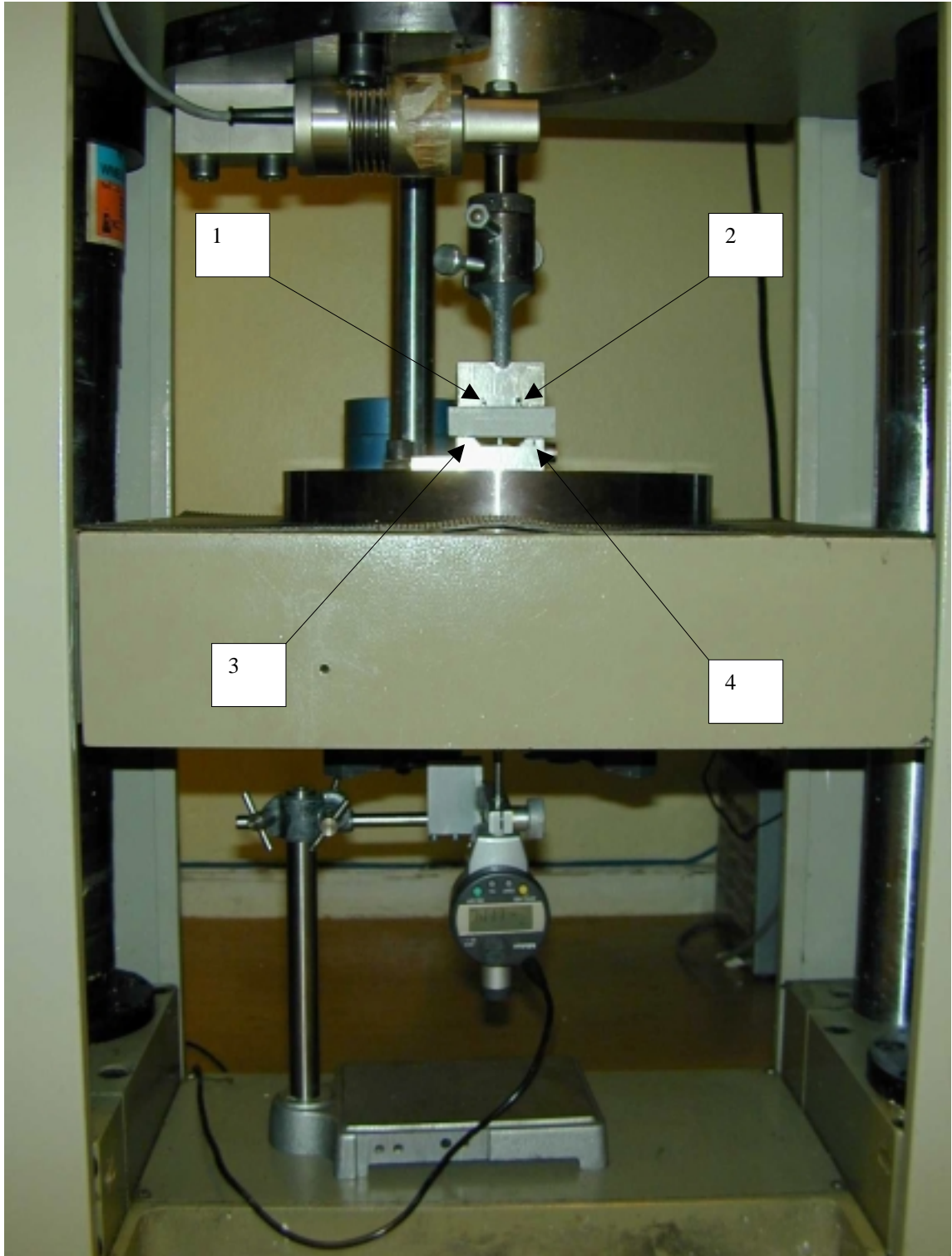
Böjhållfasthetstesterna utfördes vid Svenska Keramikinstitutet, Swedish Ceramic Institute (SCI), i Göteborg under september/oktober 1999.

Testerna utfördes med hjälp av en press med märke "Zwick 1464" (se figur 2-4).

Brottlasten registrerades med en noggrannhet av 10^{-2} N. Belastningshastigheten var 0,1 mm/min. Signalen från lastcellen registrerades med 0,3 sekunders intervall. Provstavarnas centrala nedböjning bestämdes med en digital mätlocka vars upplösning var 10^{-3} mm. Signalen från mätlockan registrerades med 0,3 sekunders intervall.

Böjfixturen, i vilken provstavarna placerades, hade 20 mm mellan angreppspunkterna och 40 mm mellan stödpunkterna. I alla fyra punkterna var kontaktelementen utformade som cylinderkroppar vilka i sin tur var inbyggda i respektive ok med två frihetsgrader (rotation kring x-z axlar).

Beträffande provstavar, se avsnitt 2.2.



Figur 2-4. Testrigg (press och böjfixtur) för fyrapunktsböjtest med lastcell och mätklocka angreppspunkter i böjfixtur: 1 respektive 2, stödpunkter: 3 respektive 4.

2.2 Provstavar

Provstavarna till fyrapunktsböjtesterna togs ut ur en enaxligt kompakterad fullstor bentonitring.

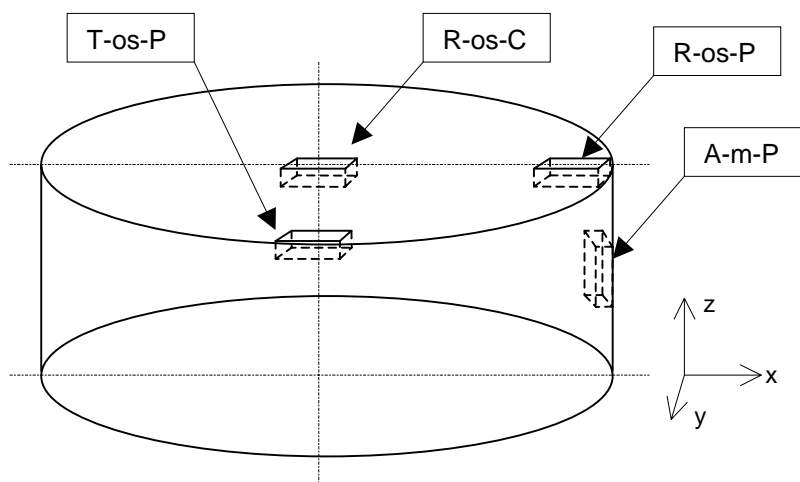
Ringens material- och produktionsdata:

- typ av bentonit: MX-80,
- kompakteringstryck: 100 MPa,
- densitet: ca 2,1,
- vattenkvot: ca 16 %.

Provstavarna märktes efter de ställen i bentonitringen från vilka de tagits ut. Själva lokaliseringen har däremot inte utförts med någon millimeterprecision i x-y-z led, utan den följde enbart en mera grovskalig placering i ”moderkroppen” (exempelvis i z-riktning: ”moderkroppens ovansida” eller ”moderkroppens mitt” eller ”moderkroppens undersida”, i x/y-riktning: ”periferi” eller ”centrum”). I samband med orienteringen har tre olika sorteringsbegrepp använts så som ”axiell”, ”radiell” och ”tangentiell” (se figur 2-5).

Provstavarnas gavs benämningar utifrån dessa läges- och orienteringsangivelser. Exempelvis avser benämningen ”TosP” ”Tangentiellt från moderkroppens ovansida vid Periferin”. Märkningar gjordes på den sidan av provkroppen som var parallell med moderkroppens ändytor.

Sammanlagt togs 17 st provstavar ur denna bentonitring. Antalet olika kombinationer utifrån lokaliserings- och orienteringsbegreppen är arton. (Om ”moderkroppen” hade varit ett block skulle detta antal provstavar reducerats till femton på grund av att ”radiell” och ”tangentiell” orientering i kroppens centrum kan betraktas som likvärdiga. Benämningen R-os-C i ringsammanhang innebär en provstav i närheten av ringens innerdiameter.)



Figur 2-5. Identifiering, orientering och benämning av provstavar. (Figuren visar ett block men i det aktuella fallet gjordes uttaget ur en ring.)

Provstavarnas ”teoretiska” dimension var ca 20x20 i tvärsnitt och längden var ca 60 mm. Det faktiska måttet på varje provstav mättes och registrerades före inplaceringen i böjfixturen och redovisas i bilaga 1. Provstavarna inplacerades så att märkt sida blev horisontell.

På några provstavar var långsidorna inte tillräckligt parallella med varandra. Dessa har därför torrslipats med sandpapper längs en eller två långsidor. Samtliga provstavar har kantbrutits med torrslipning på dragsidan.

2.3 Resultat

Resultatet, i form av uppmätt nedböjning vid brott samt registrerad brottlaster, visas i tabell 2-1.

Tabell 2-1. Resultat av fyrpunktsböjtester i form av uppmätt central nedböjning och brottlaster.

Provstav nr	Orientering i moderkroppen	Nedböjning vid brott (mm)	Brottlaster (N)
1	TosP	0.155	765
2	RosC	0.098	564.66
3	RosP	0.125	594.36
4	AosC	0.154	926.34
5	AosP	0.120	702.18
6	TmP	0.084	540.32
7	RmC	0.245	727.73
8	RmP	0.134	767.16
9	AmC	0.183	616.50
10	AmP	0.094	549.08
11	TnsP	0.107	271.86
12	RnsC	0.063	354.12
13	RnsP	0.083	295.47
14	AnsC	0.069	380.17
15	AnsP	0.080	401.34
16	TmC	0.166	826.8
17	TnsC	0.104	669.8

Primärdata i form av registrerade dimensioner för respektive provstav, vattenkvot (w) samt densitet visas i bilaga 1. Korrespondensen mellan beteckningarna vid angivelsen av primärdata samt beteckningen för respektive provstav är som följer:

- provstavar med ”os” i beteckningen motsvarar uttagningsområden A1, B1, C1, C’1, C’’1 (se bilaga 3),
- provstavar med ”m” i beteckningen motsvarar uttagningsområden A3, B3, C3, C’3, C’’3 (se bilaga 3),
- provstavar med ”ns” i beteckningen motsvarar uttagningsområden A5, B5, C5, C’5, C’’5 (se bilaga 3).

2.4 Analys

2.4.1 Böjhållfasthet

För beräkningen av böjhållfasthet har följande ekvation använts:

$$\sigma_{BROTT} = \frac{1,5 \times P_{brott} (L_0 - L_i)}{b \times h^2} \quad (2-1)$$

där

σ_{BROTT} = maximal dragpåkänning vid brott (MPa),

P_{brott} = brottlast (N),

L_0 = avståndet mellan stödpunkterna i böjfixturen (mm),

L_i = avståndet mellan angreppspunkterna i böjfixturen (mm),

b = tvärsnittets breddmått (mm),

h = tvärsnittets höjdmått (mm).

Resultatet återges i tabell 2-2 (primärdata i form av provstavarnas dimensioner samt registrerad brottlast finns i bilaga 1 respektive bilaga 2).

Tabell 2-2. Resultat av fyrapunktsböjtester i form av beräknad draghållfasthet.

Provstav nr	Orientering i moderkroppen	Max. draghållf. (σ_{BROTT}) (MPa)
1	TosP	2,9
2	RosC	2,1
3	RosP	2,7
4	AosC	3,2
5	AosP	2,7
6	TmP	2,0
7	RmC	2,8
8	RmP	3,5
9	AmC	2,6
10	AmP	2,9
11	TnsP	1,2
12	RnsC	1,7
13	RnsP	1,3
14	AnsC	1,4
15	AnsP	1,8
16	TmC	3,7
17	TnsC	2,3

2.4.2 Töjning

För beräkningen av töjning har följande ekvation använts:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{6h}{(L-a) \times (L+2a)} \times y_L \quad (2-2)$$

där

ε = töjning,

h = tvärsnittets höjdmått (mm),

L = avståndet mellan stödpunkterna i böjfixturen (mm),

a = avståndet mellan angreppspunkterna i böjfixturen (mm),

y_L = angreppspunkternas nedböjning (mm).

Resultatet återges i tabell 2-3.

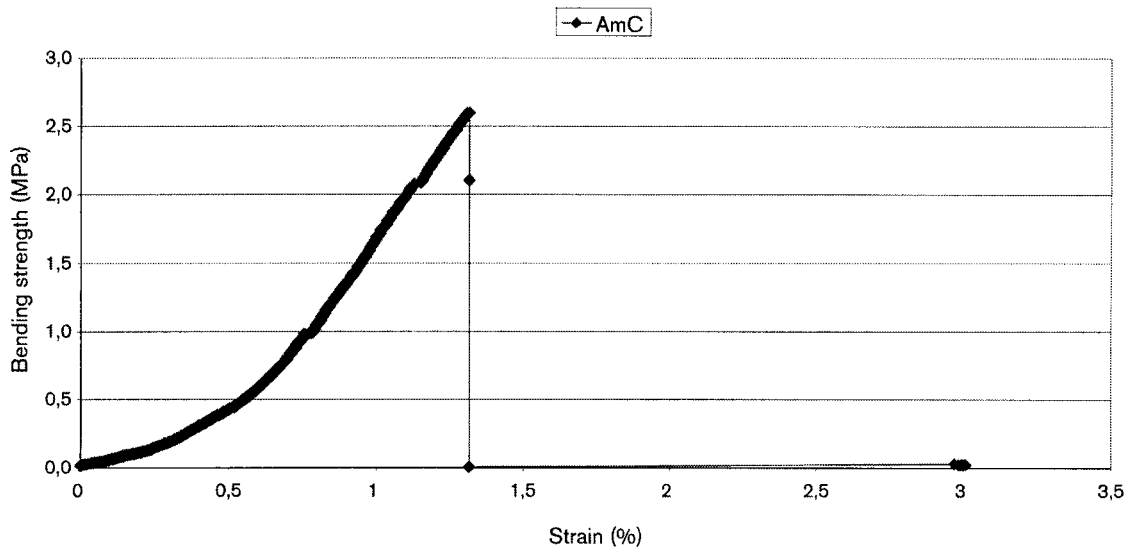
Figureerna 2-6 – 2-9 visar spännings-töjningsdiagrammen för de tester som gav högsta respektive lägsta töjnings- respektive brotthållfasthetsvärden.

(Primärdata i form av uppmätta siffervärden för provstavens centrala nedböjning samt spännings-töjningskurvan för övriga provstavar redovisas i bilaga 1 och 2.)

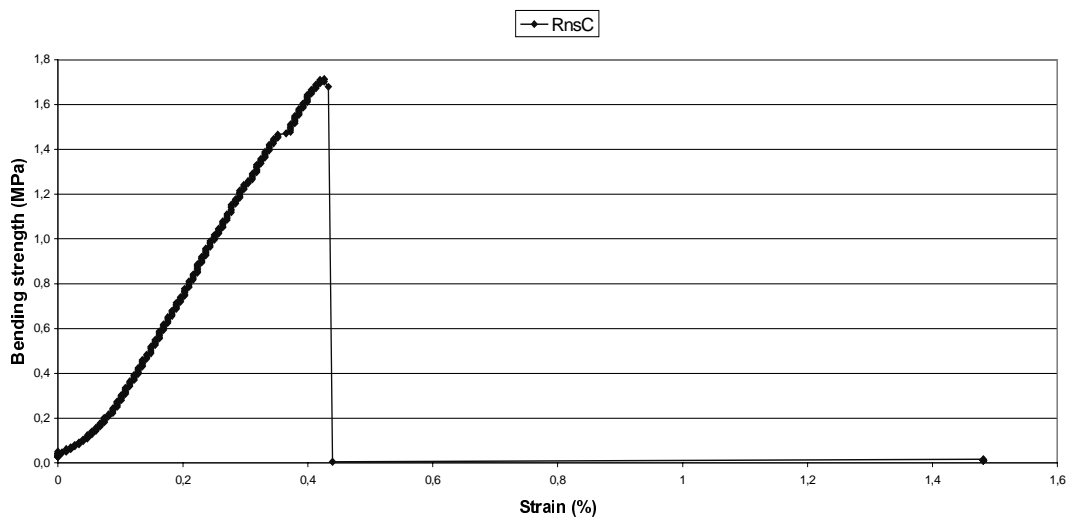
Tabell 2-3. Resultat av fyrapunktsböjtester i form av beräknad töjning.

Provstav nr	Orientering i moderkroppen	Max. töjning (ε) (%)
1	TosP	(1,154)* 0,8
2	RosC	(0,744) 0,5
3	RosP	(0,890) 0,6
4	AosC	(1,183) 0,8
5	AosP	(0,918) 0,6
6	TmP	(0,644) 0,5
7	RmC	(1,830) 1,3
8	RmP	(0,950) 0,7
9	AmC	(1,316) 0,9
10	AmP	(0,612) 0,4
11	TnsP	(0,788) 0,6
12	RnsC	(0,426) 0,3
13	RnsP	(0,593) 0,4
14	AnsC	(0,509) 0,4
15	AnsP	(0,582) 0,4
16	TmC	(1,158) 0,8
17	TnsC	(0,801) 0,6

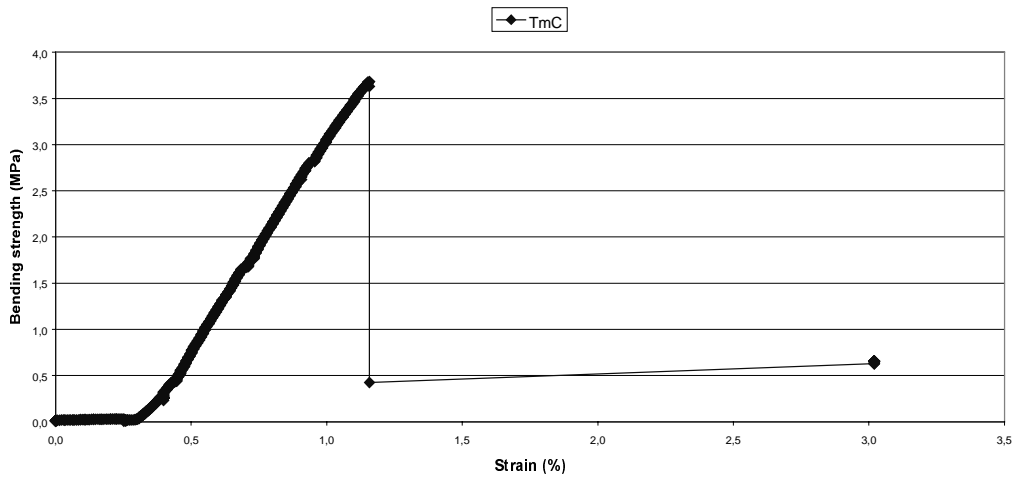
* Värdena i parentes har SCI beräknat med användning av ekvation nr (2-2) och provstavens centrala nedböjning. Detta ger inte något relevant töjningsvärde i och med att ekvationen nr (2-2) är härledd från y_L . Skillnaden mellan den centrala nedböjningen och y_L uppskattades av SCI till 30 %. Värden utan parentes visar de korrigerade töjningsvärdena.



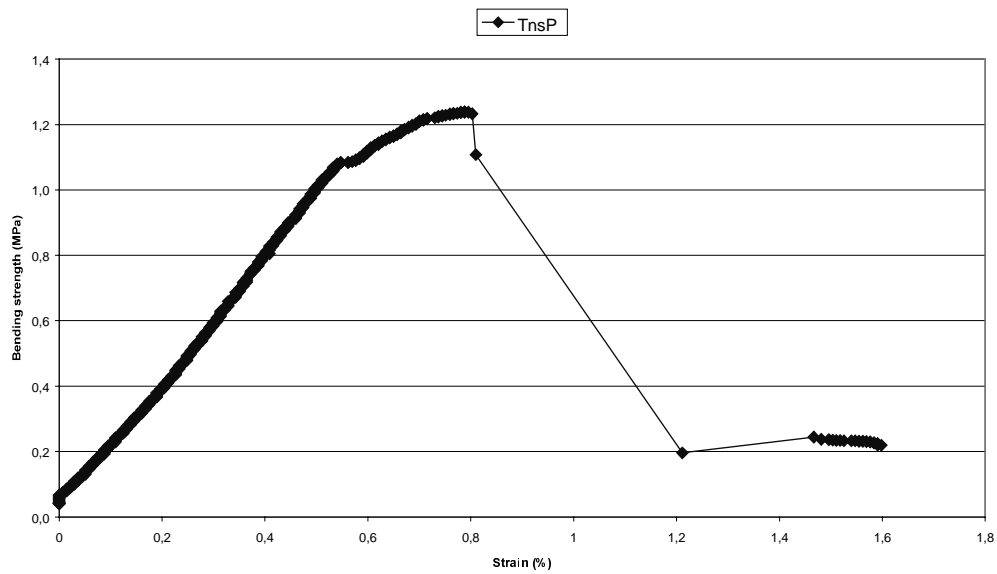
Figur 2-6. Diagram över spänning som funktion av töjning för provstav "AmC" (gav högsta töjningen: $\varepsilon = (1,3) 0,9\%$ vid $\sigma_{\text{brott}} = 2,6 \text{ MPa}$).



Figur 2-7. Diagram över spänning som funktion av töjning för provstav "RnsC" (gav lägsta töjningen: $\varepsilon = (0,42) 0,3\%$ vid $\sigma_{\text{brott}} = 1,7 \text{ MPa}$).



Figur 2-8. Diagram över spänning som funktion av töjning för provstav "TmC" (gav högsta hållfastheten: $\sigma_{\text{brott}} = 3,7 \text{ MPa}$ vid töjning: $\varepsilon = (1,2) 0,8 \%$).



Figur 2-9. Diagram över spänning som funktion av töjning för provstav "TnsP" (gav lägsta hållfastheten: $\sigma_{\text{brott}} = 1,2 \text{ MPa}$ vid töjning: $\varepsilon = (0,8) 0,6 \%$).

2.4.3 Statistik

Det aritmetiska medelvärdet och standardavvikelsen har beräknats gruppvis för de provstavar som har samma typ av placering eller orientering i moderkroppen. Resultatet presenteras i tabell 2-4. Beräkningsformlerna är följande:

$$\text{Aritmetisk medelvärde: } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (2-3)$$

$$\text{Standardavvikelse: } s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2} \quad (2-4)$$

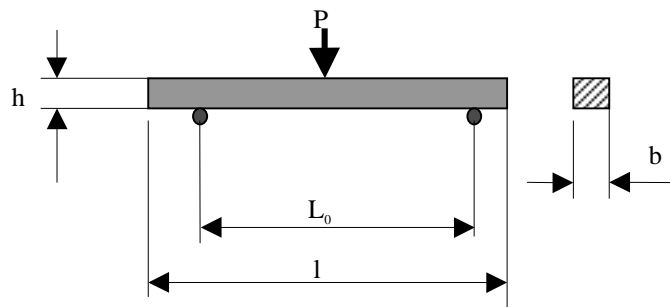
Tabell 2-4. Resultat av fyrapunktsböjttester i form av statistik över medelvärden och standardavvikelser för töjning och hållfasthet.

Nr	Grupper av provstavar med olika placering och orientering i moderkroppen	Medelvärde för hållfasthet (\bar{x}_{HF}) (MPa)	Standardavvikelse för hållfasthet (s_{HF}) (MPa)	Medelvärdet för töjning ($\bar{x}_{TÖ}$) (%)	Standardavvikelse för töjning ($s_{TÖ}$) (%)
1	Alla "os"	2,7	0,4	0,7	0,2
2	Alla "m"	2,9	0,6	0,8	0,5
3	Alla "ns"	1,6	0,4	0,4	0,2
4	Alla "C"	2,4	0,7	0,7	0,5
5	Alla "P"	2,3	0,8	0,6	0,2
6	Alla "A"	2,4	0,7	0,6	0,3
7	Alla "R"	2,3	0,8	0,6	0,5
8	Alla "T"	2,4	0,9	0,6	0,2
9	Alla	2,4	0,8	0,6	0,4

3 Trepunktsböjtester

Vid ett trepunktsböjtest påförs de aktiva och reaktiva krafterna provkroppen i tre punkter: 1 st angreppspunkt och 2 st stödpunkter.

Principuppställningen för ett trepunktsböjtest visas i figur 3-1 nedan.

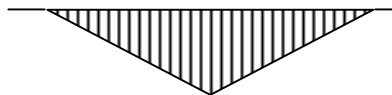


Figur 3-1. Trepunktsböjtest – principuppställning.

Böjhållfasthetstestets generella egenskaper har belysts i avsnitt 2.

Trepunktsböjtestets specifika egenskaper:

1. Fördelningen av maximalt böjmoment respektive dragspänning är triangelformig (se figur 3-2).



Figur 3-2. Momentdiagrammets form vid trepunktsböjhållfasthetstest.

2. Mellan angreppspunkterna påförs provkroppen inte bara moment utan även skjuvkrafter (se figur 3-3).



Figur 3-3. Tvärkraftsdiagrammets form vid trepunktsböjhållfasthetstest.

3. Lägre känslighet för yt- och volymdefekter än vid fyrapunktsböjtester.

3.1 Test

Det trepunktsböjtest som refereras i denna rapport har utförts av CLAY Technology AB (CTA) under hösten 1999.

Testet avsåg provstavar tagna ur såväl ring- som blockformade moderkroppar. Föreliggande rapport refererar till den del av trepunktsböjtesterna som korresponderar med det aktuella fyrapunktsböjtestet dvs trepunktsböjtest med provstavar tagna ur en ringformad moderkropp.

Testet och dess genomförande i sin helhet beskrivs i en separat rapport utgiven av CTA /3-1 och 3-2/.

3.2 Provstavar

Provstavarna till trepunktsböjtester togs ur en enaxligt kompakterad fullstor bentonit-ring.

Ringens material- och produktionsdata:

- bentonittyp: MX-80,
- kompakteringstryck: 100 MPa,
- densitet: ca 2,1,
- vattenkvot: ca 16 %,

Provstavarna märktes efter de ställen i bentonitringen från vilka de tagits ut. Själva lokaliseringen har inte utförts med någon millimeterprecision i x-y-z led. Den följde enbart en mer grovskalig placering i ”moderkroppen” enligt följande mönster i z-riktning: ordningssiffra ”1” betyder ”moderkroppens ovansida”, ordningssiffra ”5” betyder ”moderkroppens undersida”, ordningssiffra ”3” betyder ”moderkroppens mitt”. I x/y riktning är beteckningarna följande: A, B och C” betyder yttre periferi medan C betyder inre periferi (ring) och C’ betecknar ett radiellt mellanläge (se även bilaga 3).

I samband med orienteringen har inga sorteringsbegrepp använts.

Provstavarna gavs benämningar utifrån dessa läges- och orienteringsangivelser. Exempelvis avser benämningen ”A1” ”från moderkroppens ovansida vid yttre periferin”.

Antalet uttagna provstavar var 25 st.

3.3 Resultat

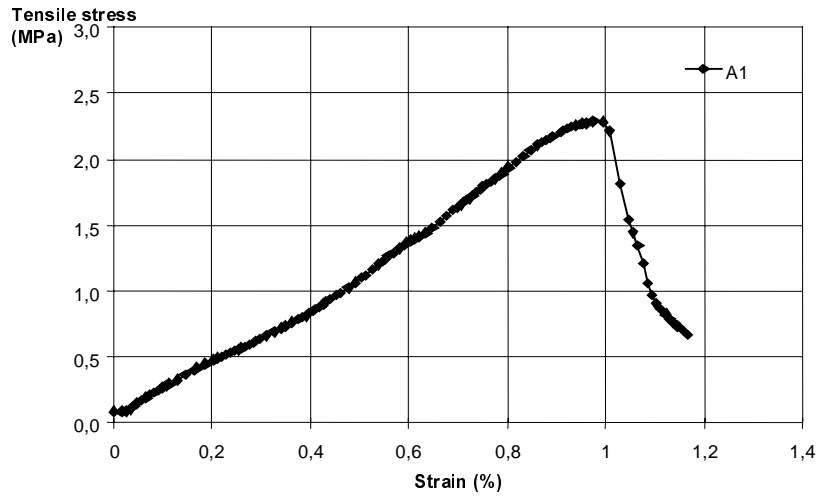
Resultatet, i form av beräknad töjning och draghållfasthet visas i tabell 3-1.

Figurerna 3-4 – 3-7 visar spännings-töjningsdiagrammen för tester som gav högsta respektive lägsta töjnings- respektive brotthållfasthetsvärden.

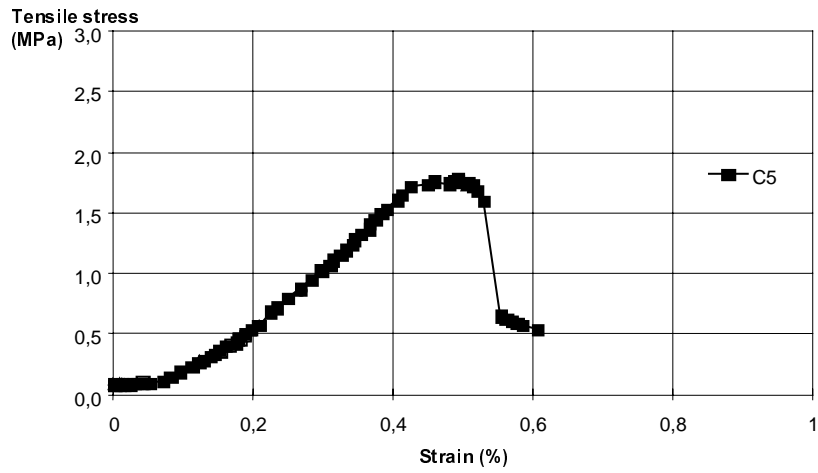
(Primärdata i form av registrerad vattenkvot (w) och densitet finns i bilaga 4).

Tabell 3-1. Resultat av trepunktsböjtester i form av beräknad töjning och hållfasthet.

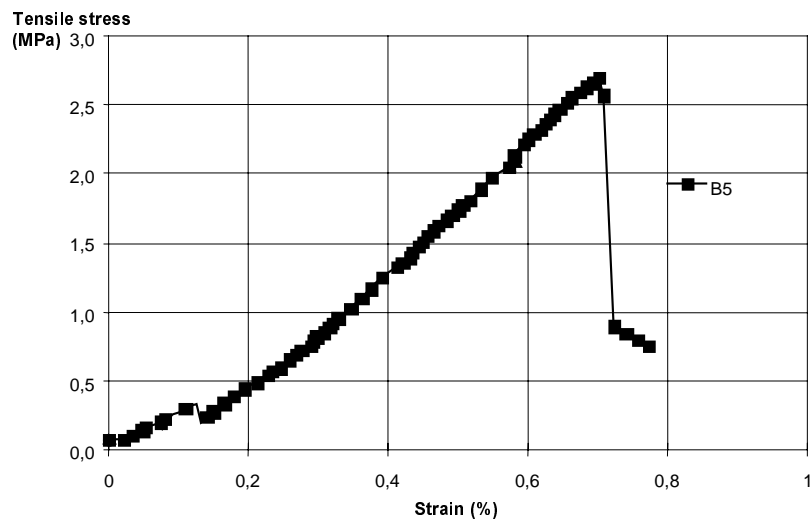
Provstav nr	Placering i moderkroppen	Max. töjning (ϵ) (%)	Max. draghållf. (σ_{BROTT}) (MPa)
1	A1	0,975024	2,288188
2	A2	0,61541	2,09349
3	A3	0,541685	2,22478
4	A4	0,606411	1,980423
5	A5	0,596951	2,574407
6	B1	0,674569	2,6818
7	B2	0,63179	2,101197
8	B3	0,605694	2,127159
9	B4	0,712445	1,89206
10	B5	0,701387	2,697715
11	C1	0,788996	1,913381
12	C2	0,717912	2,160608
13	C3	0,673908	2,241477
14	C4	0,602066	2,55522
15	C5	0,490703	1,784821
16	C'1	0,604745	1,66845
17	C'2	0,617018	1,889237
18	C'3	0,56019	2,391826
19	C'4	0,741192	2,150294
20	C'5	0,627254	2,067478
21	C''1	0,824916	2,135925
22	C''2	0,649901	2,167374
23	C''3	0,831015	1,707647
24	C''4	0,611346	2,154951
25	C''5	0,61372	2,111922



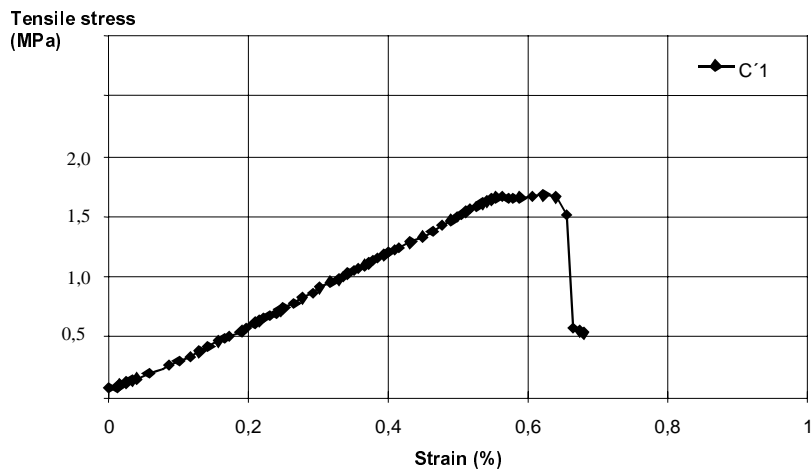
Figur 3-4. Diagram över spänning som funktion av töjning för provstav "A1" (gav högsta töjningen: $\varepsilon = 0,975\%$ vid $\sigma_{\text{BROTT}} = 2,28\text{ MPa}$).



Figur 3-5. Diagram över spänning som funktion av töjning för provstav "C5" (gav lägsta töjningen: $\varepsilon = 0,490\%$ vid $\sigma_{\text{BROTT}} = 1,784\text{ MPa}$).



Figur 3-6. Diagram över spänning som funktion av töjning för provstav "B5" (gav högsta hållfastheten: $\sigma_{\text{BROTT}} = 2,69 \text{ MPa}$ vid töjning: $\epsilon = 0,701 \%$).



Figur 3-7. Diagram över spänning som funktion av töjning för provstav "B5" (gav lägsta hållfastheten: $\sigma_{\text{BROTT}} = 1,66 \text{ MPa}$ vid töjning: $\epsilon = 0,604 \%$).

3.3.1 Statistik

Det aritmetiska medelvärdet och standardavvikelsen, enligt ekvationerna (2-3) och (2-4) har beräknats gruppvis för de provstavar som har samma typ av placering i moderkroppen och presenteras i tabell 3-2.

Tabell 3-2. Resultat av trepunktsböjtester i form av statistik över medelvärden och standardavvikelser för töjning och hållfasthet.

Nr	Grupper av provstavar med olika placering och orientering i moderkroppen	Medelvärde för hållfasthet (\bar{x}_{HF}) (MPa)	Standardavvikelse för hållfasthet (s_{HF}) (MPa)	Medelvärde för töjning $(\bar{x}_{TÖ})$ (%)	Standardavvikelse för töjning $(s_{TÖ})$ (%)
1	Alla "1"	2,1	0,4	0,8	0,1
2	Alla "3"	2,1	0,3	0,6	0,1
3	Alla "5"	2,2	0,4	0,6	0,1
4	Alla A+B+ C"	2,2	0,3	0,7	0,2
5	Alla C	2,1	0,3	0,7	0,1
6	Alla C'	2,0	0,3	0,6	0,1
7	Alla	2,2	0,3	0,7	0,1

4 Jämförelse

Jämförelsen avser uppgifterna i tabellerna 2-4 och 3-2.

I avsnitten 4.1 och 4.2 formulerade bedömningar är antingen grundade på direkta jämförelser av korresponderande uppgifter hos tre- respektive fyrapunktstester eller utgör endast ett konstaterande utifrån något signifikant för den ena eller för den andra test-typen.

I avsnitt 4.3 formuleras de konsekvenser som framstår som adekvata utgående från bedömningarna i avsnitt 4.1 respektive 4.2.

4.1 Hållfasthet

1. Hållfasthetens medelvärde för alla provstavar ($\bar{x}_{HF_{ALLA}}$) är ungefär 10 % högre i fyrapunktstestet än i trepunktstestet.
2. Ur fyrapunktstestet framgår att moderkroppens nedre del (sett i kompakteringens riktning) är signifikant svagare än kroppens övriga delar. En sådan fördelning av hållfasthetsvärden framgår inte av trepunktstestet.
3. De hållfasthetsvärden som erhållits i fyrapunktstestet för provstavar som tagits ut ur moderkroppens nedre ändplan ($\bar{x}_{HF_{ns}}$) är ca 65 % av medelvärdet för alla provstavar ($\bar{x}_{HF_{ALLA}}$).
4. Standardavvikelsen för fyrapunktstestets hållfasthetsvärde för alla provstavar ($s_{HF_{ALLA}}$) är ungefär 250 % större än standardavvikelsen hos trepunktstestet.
5. Standardavvikelsen för $\bar{x}_{HF_{ns}}$ hos fyrapunktstestet är hälften av standardavvikelsen för $\bar{x}_{HF_{ALLA}}$.

4.2 Töjning

1. Töjningens medelvärde för alla provstavar ($\bar{x}_{TÖ_{ALLA}}$) hos tre- respektive fyrapunktstester visar en god överensstämmelse.
2. Töjningens medelvärde för de provstavar som är uttagna från moderkroppens nedre ändplan visar en lika stor minskning, i förhållande till medelvärdet för alla ($\bar{x}_{TÖ_{ALLA}}$), som hållfasthetsvärdet gör.
3. Standardavvikelsen för fyrapunktstestets töjningsvärde för alla provstavar ($s_{TÖ_{ALLA}}$) är ungefär 250 % större än standardavvikelsen hos trepunktstestet.

4.3 Konsekvenser

1. Användning av ett sk sugkoppslyftverktyg, som är anslutet till den färdigpressade bentonitkroppens ovansida vid hanteringen, medför en förhöjd risk för haveri. Om sådan hantering ej rimligen kan undvikas bör den vara kortvarig samt utföras med uppmärksamhet avseende dynamiska lasteffekter.
2. Att vända en färdigpressad bentonitkropp (undersidan hamnar uppåt) och sedan hantera den sedan enligt ovan är inte tillrådligt.
3. Resultaten från fyrapunktstester visar en högre spridning ($s_{HF,ALLA} = 0,8$ MPa) än vid trepunktsböjttester.

En matematisk-statistisk tolkning av denna bild är följande:

- Sannolikheten för att en kompakterad bentonitkropps hållfasthetsvärde ligger inom $\bar{x}_{HF,ALLA} \pm 1x s_{HF,ALLA}$ dvs $2,4$ MPa \pm $0,8$ MPa är 68 %.
- Sannolikheten för att en kompakterad bentonitkropps hållfasthetsvärde ligger inom $\bar{x}_{HF,ALLA} \pm 2x s_{HF,ALLA}$ dvs $2,4$ MPa \pm $1,6$ MPa är 95 %.
- Sannolikheten för att en kompakterad bentonitkropps hållfasthetsvärde ligger inom $\bar{x}_{HF,ALLA} \pm 3x s_{HF,ALLA}$ dvs $2,4$ MPa \pm $2,4$ MPa är 99 %.

Det bör emellertid samtidigt beaktas att detta är en tolkning som utgår från de ovan angivna slutsatserna vilka i sin tur vilar på ett begränsat statistiskt dataunderlag.

Om vi antar att antalet provstavar inte var 17 st (se avsnitt 2.2) utan exempelvis 100 st och dessa 100 st provstavar skulle testas och därvid ge upphov till samma histogram som de aktuella 17 st provstavarna. Detta skulle då innebära att standardavvikelsen (enligt ekvation 2-4) blir 0,3 MPa. Spannet för 99 % konfidens ovan skulle då bli $2,4$ MPa \pm $0,9$ MPa.

5 FEM-modellering

Påkänningen och det av denna inducerade spänningstillståndet i det nedersta bentonitblocket i en komplett stapel innehållande en kapsel i ett vertikalt deponeringshål har beräknats med ANSYS.

Det i beräkningarna antagna blocket var behäftat med ett produktionstekniskt formfel: en kup-formad bottenyta. Kontaktytan under blocket antogs vara stel.

Modellen för det nedersta blocket byggdes upp som en axialsymmetrisk modell, dvs som en rotationssymmetrisk kropp, med laster och deformationer i en dimension. Modellen innehåller kontaktytor som medger förändring av storleken hos stödytor när lasten ändras.

Följande ingångsdata användes:

- densitet: $\rho = 2087 \text{ kg/m}^3$,
- elasticitetsmodul: $E = 321,7 \text{ MPa}$ (kroppen antogs vara isotrop),
- Poissons tal: $\nu = 0,21$,
- formfel: $\delta = 0,5 - 3 \text{ mm}$,
- dimensioner: block: $\varnothing 1650$, höjd 500, ring: $\varnothing 1650/1070$, höjd 500,
- antalet ringar i bufferten: 12 st,
- kapselns vikt: 25 ton.

Bestämningen av densitet, elasticitetsmodul (E-modul) samt Poissons tal eller tvärkontraktionstal framgår av bilaga 5. I bilaga 5 presenteras resultaten från fyra tester där provkropparnas vattenkvot och längdmått var olika. För FEM-beräkningen valdes de värden för ρ , E och ν som kommer från provkroppen med vattenkvot 16,2 % och längd 40 mm. Valet innebär det lägsta E-värdet vilket kan ses som ett konservativt val. Å andra sidan är det så att ett högre E-värde i axiell led (!) skulle resultera i ett högre böjmoment. Om ett sådant val kombineras med ett lågt E-värde i radiell led (!) blir resultatet att mothållskraften i ringled (mot det redan högre böjmomentet) blir lägre, dvs det kup-formade blocket kommer att ”plattas till” redan vid en lägre last. I det för aktuell FEM-beräkning gällande antagandet görs ingen åtskillnad beträffande E-modulens värde i olika riktningar, blocket antas vara isotropt (och ej ortotrop).

Beskrivning av beräkningen framgår av bilaga 6.

5.1 Resultat

FEM-beräkningens resultat återges i tabell 5-1. Resultat, i form av plottade bilder med värdespektrum över de radiella respektive axiella spänningsfördelningarna, återfinns också i bilaga 6.

Tabell 5-1. Resultat av FEM-beräkningen.

		Axiell spänningsfördelning		Radiell spänningsfördelning	
		$\delta=0,5$ mm	$\delta=3$ mm	$\delta=0,5$ mm	$\delta=3$ mm
Högsta spänningsnivå (MPa)	Drag	0,06	0,16	0,29	0,57
	Tryck	0,98	1,90	0,57	1,10
Stödytans \varnothing storlek (mm)		890	350	840	300

5.2 Analys

5.2.1 Allmänt

Den utförda FEM-beräkningen präglas av global karaktär. Detta innebär att den uppbyggda modellen inte är avsedd att ge någon detaljerad information beträffande de lokala spänningsförhållandena. Följden av detta är följande:

- inga informationer ges om spänningsnivåer under påkänningar som leder till lokal krossning kring den primära stödpunkten och resulterar i ökning av stödytan,
- inga informationer ges om de lokala spänningsnivåerna längs kontaktlinjen mellan kapselns nedre kant och blockets ovsida.

Den utförda beräkningen är inte heller av brottmekanisk art, dvs det nedersta blockets material har antagits vara felfritt och homogent. Beräkningen och modellen var inte avsedda att kunna ge information om huruvida det existerande spänningstillståndet initierar sprickpropagering utifrån eventuellt befintliga defekter i materialet.

Beräkningen återger en statisk lastsituation och tar inte hänsyn till möjliga dynamiska effekter (exempelvis i samband med placeringen av ringar).

5.2.2 Tolkning av erhållna resultat

Resultatet innehåller kvantitativa uppgifter om spänningsnivåer i axiell respektive radiell riktning, dels vid olika storlekar av formfelet hos det nedersta blocket (δ), dels vid olika laster (1 ring, 12 ringar, 12 ringar+kapsel).

För att ge tolkningen en konkret och kvantitativ innebörd konverteras det tvåaxliga spänningstillståndet (axiell och radiell spänningsfördelning) till enaxligt. Den enaxliga (linjära) spänningen (σ_{jfr}) kan ses som normalspänning och är därmed relevant att jämföra med tillgängliga hållfasthetsvärden från empiriska försök och tester avseende $\sigma_{brott-drag}$ respektive $\sigma_{brott-tryck}$.

Hållfasthetsvärden för $\sigma_{brott-drag}$

I den föreliggande rapporten presenterade resultat från utförda fyrpunktsböjtester (se tabell 2-2) används som referensnivå för materialets bärförmåga avseende dragpåkänning.

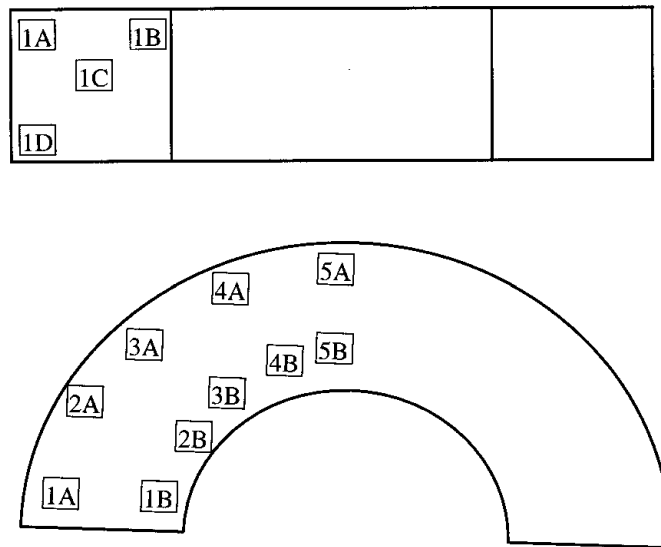
Hållfasthetsvärden för $\sigma_{brott-tryck}$

Referensnivån för materialets bärförmåga avseende tryckpåkänning hämtas från tidigare utförd enaxligt tryckförsök utförda av CLAY Technology AB under 1997 /5-1/ .

Provkropparna för tryckförsöket togs ut ur isostatiskt kompakterade block (bentonittyp: MX-80, vattenkvot (w): ca 10 %, presstryck: 100 MPa).

Uttaget gjordes enligt figur 5-1.

Resultatet visas i tabell 5-2.



Figur 5-1. Uttagsplan för enaxligt pressningsförsök för bestämning av tryckhållfasthet.

Tabell 5-2. Resultat av enaxligt pressningsförsök i form av beräknad töjning och hållfasthet.

Prov	Töjning (ϵ) (%)	Hållfasthet ($\sigma_{\text{brott-tryck}}$) (MPa)
1A	1,49	9,19
1B	1,64	10,16
2A	1,53	8,60
2B	1,41	8,12
3A	1,52	8,96
3B	1,50	9,66
4A	1,26	8,39
4B	1,53	9,29
5A	1,38	8,73
5B	1,56	8,96

Konvertering

Konverteringen kan göras efter olika spänningshypoteser. När materialet inte flyter före brott utan brister i stort sett direkt (gjutjärn, sten, betong) ger Mohrs brotthypotes /5-2, 5-3/ en relevant grund för konvertering.

Enligt hypotesen är det en bestämd kombination av normal- och skjuvspänningar i snittytan som är avgörande för brott. Denna spänningskombination ersätts av en jämförelsespänning:

$$\sigma_{jfr} = \sigma_1 - \frac{\sigma_B}{\sigma_{Bt}} \sigma_2$$

$$\sigma_1 \geq \sigma_2$$

där σ_1 och σ_2 är huvudspänningarna medan σ_B är brottgränsen för dragning och σ_{Bt} är brottgränsen för tryckning. När spänningstillståndet beskrivs med hjälp av normal- respektive skjuvspänningar (σ och τ) kan huvudspänningar (σ_1 respektive σ_2) identifieras med hjälp av Mohrs spänningscirkel.

De i den aktuella FEM-modelleringen identifierade axiella- och radiella spänningarna betraktas direkt som huvudspänningar (σ_1 respektive σ_2).

Förhållandet mellan σ_B respektive σ_{Bt} bestäms utifrån värdena i tabell 5-3 ($\sigma_{\text{brott-drag}}$, $\sigma_{\text{brott-tryck}}$). Med hänsyn till att dessa värden är angivna med ett intervall används det lägsta förhållandet ($\sigma_B/\sigma_{Bt} = 0,1$) eftersom det ger ett högre σ_{jfr} vilket alltså motsvarar ett konservativt sätt att betrakta det rådande spänningstillståndet.

I tabell 5-3 visas en sammanfattning över FEM-resultat, jämförelsespänning (σ_{jfr}), brottgränser ($\sigma_{\text{brott-drag}}$, $\sigma_{\text{brott-tryck}}$).

Tabell 5-3. Konvertering av tvåaxligt spänningstillstånd till enaxligt enligt Mohrs brotthypotes.

Max. spänningsnivåer (MPa)				σ_{jfr}	$\sigma_{brott-drag}$	$\sigma_{brott-tryck}$
FEM-resultat				(MPa)	(MPa)	(MPa)
$\delta=0,5$ mm	drag	axiell (σ_2)	0,06	0,3	1,2 – 3,5	
		radiell (σ_1)	0,29			
	tryck	axiell (σ_1)	0,98	0,9	8,1 – 10,2	
		radiell (σ_2)	0,57			
$\delta=3,0$ mm	drag	axiell (σ_2)	0,16	0,6	1,2 – 3,5	
		radiell (σ_1)	0,57			
	tryck	axiell (σ_1)	1,90	1,7	8,1 – 10,2	
		radiell (σ_2)	1,90			

Resultatet visar att de högsta spänningarna genereras vid det största formfelet ($\delta=3,0$ mm).

Det tvåaxliga spänningstillståndet för dragpåkänning motsvarar ett linjärt spänningstillstånd vars högsta värde ligger under intervallens ingångsvärde för dragbrotthållfasthet (med faktor 2–6).

Detta spänningstillstånd uppstår i det centrala området på blockets ovansida när lasten utgörs av 12 st ringar utan kapsel. Tillskotten av kapselvikten förskjuter den axiella påkänningen från dragning till tryckning och därmed hamnar den linjära spänningen på en lägre nivå.

Spänningstillståndet för tryckpåkänning motsvarar ett linjärt spänningstillstånd vars högsta värde ligger under intervallen för tryckbrotthållfasthet (med faktor 4–6).

Detta spänningstillstånd uppstår på blockets undersida längs stödytans periferi ($\varnothing 300 - 350$ mm) när lasten utgörs av 12 st ringar med kapsel.

Det är viktigt i sammanhanget att påpeka att i tabell 5-3 visade σ_{jfr} värden är grundade på Mohrs brotthypotes vilken anses vara relevant för spröda material.

Om materialet däremot visar tendens att flyta före brott är det en annan spänningshypotes som kan utgöra grunden för en konvertering mellan tvåaxligt och enaxligt spänningstillstånd. Skjuvspänningshypotesen är en sådan hypotes som i viss mån ger en god överensstämmelse även för spröda material (t ex gjutjärn). Enligt hypotesen inträder flytning i materialet när skjuvspänningen når ett kritiskt värde.

$$\sigma_{jfr} = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}$$

I tabell 5-4 visas en sammanfattning över FEM-resultat, jämförelsespänning (σ_{jfr}), brottgränser ($\sigma_{brott-drag}$, $\sigma_{brott-tryck}$).

Tabell 5-4. Konvertering av tvåaxligt spänningstillstånd till enaxligt enligt skjuvspänningshypotes.

Max. spänningsnivåer (MPa) FEM-resultat				σ_{jfr} (MPa)	$\sigma_{brott-drag}$ (MPa)	$\sigma_{brott-tryck}$ (MPa)
$\delta=0,5$ mm	drag	axiell (σ/τ)	0,06	0,6/0,3	1,2–3,5	
		radiell (τ/σ)	0,29			
	tryck	axiell (σ/τ)	0,98	1,5/2,0	8,1–10,2	
		radiell (τ/σ)	0,57			
$\delta=3,0$ mm	drag	axiell (σ/τ)	0,16	1,2/0,7	1,2–3,5	
		radiell (τ/σ)	0,57			
	tryck	axiell (σ/τ)	1,90	4,2	8,1–10,2	
		radiell (τ/σ)	1,90			

Förklaringen till att det är två σ_{jfr} -värden som har räknats fram är, att den axiella respektive den radiella spänningsfördelningen betraktas växelvis som normal- respektive som skjuvspänning i och med att ytan i vilken brottet kan komma att inträffa, i huvudsak är orienterad, antingen parallellt med det nedersta blockets bottenplan eller vinkelrätt mot detta.

Det första värdet för σ_{jfr} karakteriserar ett linjärt spänningstillstånd där den axiella spänningsfördelningen betraktas som normalspänning och det radiella som skjuvspänning. Den potentiella brottytan i ett sådant fall är i huvudsak parallell med blockets bottenplan.

Det andra värdet för σ_{jfr} karakteriserar ett linjärt spänningstillstånd där den axiella spänningsfördelningen betraktas som skjuvspänning och det radiella som normalspänning. Den potentiella brottytan i ett sådant fall ligger i huvudsak i bottenplanets normalriktning.

Resultatet visar även här att de högsta spänningarna genereras vid det största formfelet ($\delta=3,0$ mm).

Det tvåaxliga spänningstillståndet för dragpåkänning motsvarar ett linjärt spänningstillstånd vars högsta värde ligger i nivå med intervallens ingångsvärde för dragbrotthållfasthet. I det fallet ligger den potentiella brottytan i ett plan som, i huvudsak, är parallellt med blockets bottenplan.

Spänningstillståndet för tryckpåkänning motsvarar ett linjärt spänningstillstånd vars högsta värde ligger under intervallen för tryckbrotthållfasthet. I det fallet ligger den potentiella brottytan i ett plan som, i huvudsak, motsvarar bottenplanets normalriktning.

I jämförelsen mellan ovan presenterade konverteringsprinciper kan konstateras att konvertering efter skjuvspänningshypotesen identifierar ett sådant enaxligt spänningstillstånd som ligger närmare brottgränsen för den kompakterade bentoniten.

Avslutningsvis bör betonas att vid värderingen av tolkningens giltighet bör, utöver osäkerheten i frågan om graden av materialets sprödhet, hänsyn tas även till att ovan redovisade tolkning utgår från ett FEM-resultat som har erhållits genom antagandet av:

- ett statiskt lastfall,
- ett felfritt och isotropt material.

6 Referenser

Kapitel 3

- 3-1 **Johannesson L-E, Börjesson L, 1998.** Compaction of bentonite blocks. Development of techniques for production of blocks with different shapes and sizes. SKB R-99-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 3-2 **Johannesson L-E, 1999.** Compaction of full size blocks of bentonite for the KBS-3 concept. Initial tests for evaluating the technique. SKB R-99-66, Svensk Kärnbränslehantering AB.

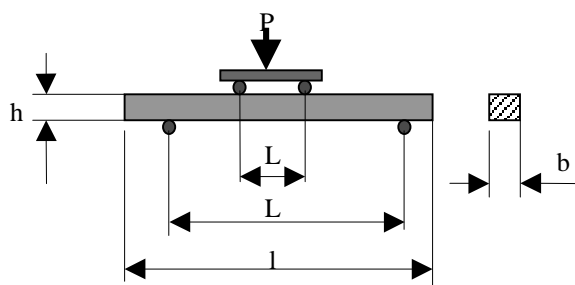
Kapitel 5

- 5-1 **Johannesson L-E, Sandén T, 1997.** Undersökning av isostatpressade block från Stripaprojektet. CLAY Technology AB. SKB PR D-97-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 5-2 **Hult J, 1968.** Hållfasthetslära.
- 5-3 **Bernhardsson A, Olsson F, 1973.** Hållfasthetslära för teknologi och konstruktion. Hermods.

Fyrpunktsböjtest

Primärdata för de provkroppar som använts i fyrpunktsböjtesterna

Provstav nr	Orientering i moderkroppen	Orientering i riggen (anmärkning)	Provstavens dimensioner			Riggens dim.	
			h (mm)	b (mm)	l (mm)	L ₀ (mm)	L ₁ (mm)
1	TosP	pilen på ovansidan	19.86	19.81	57.87	40	20
2	RosC	pilen på ovansidan	20.24	19.54	56.81	40	20
3	RosP		18.99	18.34	56.06	40	20
4	AosC	pilen på kortsida	20.49	20.49	60.75	40	20
5	AosP		20.40	18.63	59.32	40	20
6	TmP		20.44	19.16	54.17	40	20
7	RmC		19.92	19.42	60.77	40	20
8	RmP		18.9	18.19	68.5	40	20
9	AmC		19.18	19.35	60.45	40	20
10	AmP		17.37	18.96	62	40	20
11	TnsP	slipad i ca 60 min	19.46	17.39	66.1	40	20
12	RnsC	slipad i ca 20 min	18.04	19.05	59	40	20
13	RnsP	slipad i ca 26 min	19.04	18.74	71.6	40	20
14	AnsC		19.68	20.76	63.1	40	20
15	AnsP		19.41	17.80	71.8	40	20
16	TmC		18.6	19.46	55	40	20
17	TnsC	slipad i ca 20 min	20.54	20.51	58	40	20



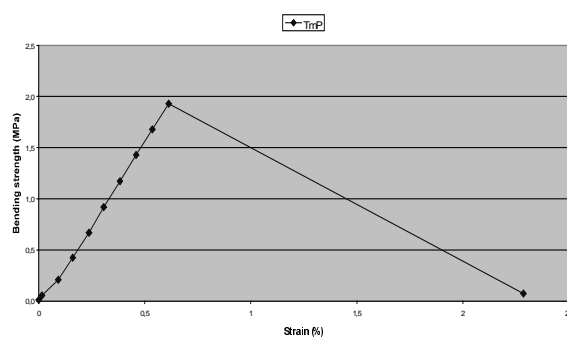
Fyrpunktsböjtest

Resultat av fyrpunktsböjtester med spännings-töjningskurvor

SIZE OF THE TEST RIGG: SAMPLE: TosP – Provstav nr 1

Load rollers (mm): 20 Width (mm): 19,81
Support rollers (mm): 40 Height (mm): 19,86
a (mm): 10

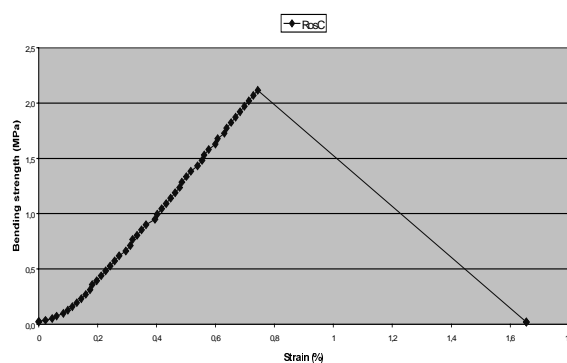
Displacement (mm)	Load (KN)	Bending strength (MPa)	Strain (%)
0	0,016787	0,064	0
0,003	0,039909	0,153	0,022
0,018	0,077879	0,299	0,134
0,03	0,123149	0,473	0,223
0,043	0,172071	0,661	0,320
0,055	0,225861	0,867	0,410
0,068	0,282815	1,086	0,506
0,079	0,342202	1,314	0,588
0,089	0,402563	1,546	0,663
0,099	0,462194	1,775	0,737
0,113	0,522069	2,004	0,842
0,122	0,5817	2,233	0,909
0,132	0,640357	2,459	0,983
0,142	0,698771	2,683	1,058
0,153	0,753048	2,891	1,139
0,438	0,018734	0,072	3,262



SIZE OF THE TEST RIGG: SAMPLE: RosC – Provstav nr 2

Load rollers (mm): 20 Width (mm): 19,54
Support rollers (mm): 40 Height (mm): 20,24
a (mm): 10

Displacement (mm)	Load (KN)	Bending strength (MPa)	Strain (%)
0	0,005835	0,022	0
0,021	0,072281	0,271	0,159
0,041	0,189839	0,711	0,311
0,061	0,317376	1,189	0,463
0,08	0,447834	1,678	0,607
0,218	0,005348	0,020	1,655

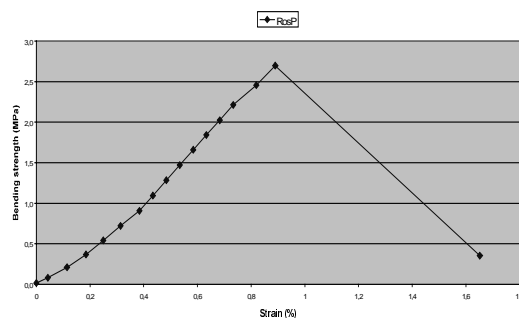


Fyrpunktsböjtest (forts)

SIZE OF THE TEST RIGG: SAMPLE: **RosP – Provstav nr 3**

Load rollers (mm): 20 Width (mm): 18,34
 Support rollers (mm): 40 Height (mm): 18,99
 a (mm): 10

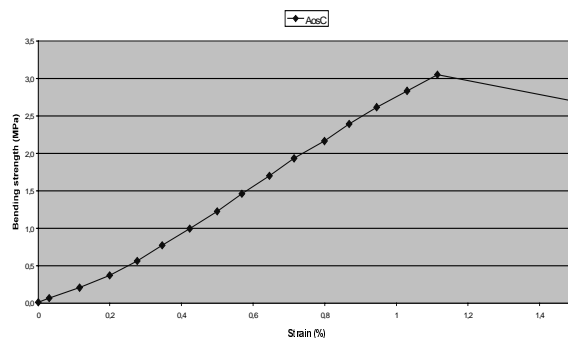
Displacement (mm)	Load (KN)	Bending strength (MPa)	Strain (%)
0	0,004131	0,019	0
0,006	0,018491	0,084	0,043
0,016	0,046724	0,212	0,114
0,026	0,081286	0,369	0,185
0,035	0,119499	0,542	0,249
0,044	0,159171	0,722	0,313
0,054	0,199818	0,906	0,385
0,061	0,241438	1,095	0,434
0,068	0,283058	1,284	0,484
0,075	0,324435	1,472	0,534
0,082	0,365568	1,658	0,584
0,089	0,406214	1,843	0,634
0,096	0,446131	2,024	0,684
0,103	0,487751	2,212	0,733
0,115	0,541297	2,455	0,819
0,125	0,594356	2,696	0,890
0,232	0,078365	0,355	1,652



SIZE OF THE TEST RIGG: SAMPLE: **AosC – Provstav nr 4**

Load rollers (mm): 20 Width (mm): 20,49
 Support rollers (mm): 40 Height (mm): 20,49
 a (mm): 10

Displacement (mm)	Load (KN)	Bending strength (MPa)	Strain (%)
0	0,003401	0,012	0
0,004	0,019708	0,069	0,031
0,015	0,059381	0,207	0,115
0,026	0,106842	0,373	0,200
0,036	0,161849	0,564	0,277
0,045	0,22221	0,775	0,346
0,055	0,285979	0,997	0,423
0,065	0,351451	1,226	0,499
0,074	0,419114	1,462	0,569
0,084	0,487264	1,699	0,645
0,093	0,554683	1,934	0,715
0,104	0,620886	2,165	0,799
0,113	0,686115	2,393	0,868
0,123	0,750127	2,616	0,945
0,134	0,812922	2,835	1,030
0,145	0,874744	3,051	1,114
0,562	0,020925	0,073	4,318
0,563	0,021412	0,075	4,326

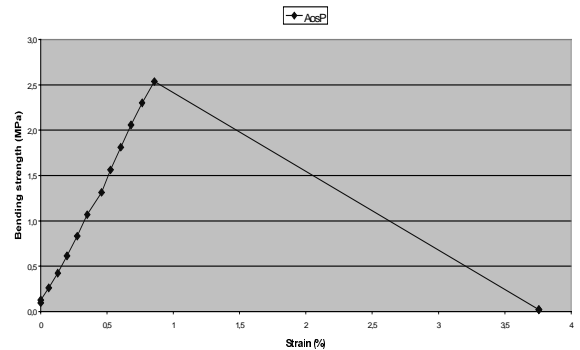


Fyrpunktsböjtest (forts)

SIZE OF THE TEST RIGG: SAMPLE: **AosP – Provstav nr 5**

Load rollers (mm): **20** Width (mm): **18,63**
 Support rollers (mm): **40** Height (mm): **20,4**
 a (mm): **10**

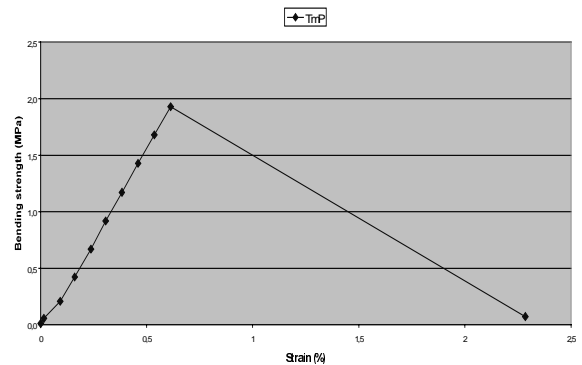
Displacement (mm)	Load (KN)	Bending strength (MPa)	Strain (%)
0	0,024819	0,096	0
0	0,032608	0,126	0,000
0,008	0,067413	0,261	0,061
0,017	0,109276	0,423	0,130
0,026	0,158928	0,615	0,199
0,036	0,214908	0,832	0,275
0,046	0,276243	1,069	0,352
0,06	0,339525	1,314	0,459
0,069	0,40378	1,562	0,528
0,079	0,468279	1,812	0,604
0,089	0,532048	2,059	0,681
0,1	0,594843	2,302	0,765
0,112	0,655691	2,537	0,857
0,491	0,005104	0,020	3,756
0,491	0,005104	0,020	3,756



SIZE OF THE TEST RIGG: SAMPLE: **TmP – Provstav nr 6**

Load rollers (mm): **20** Width (mm): **19,16**
 Support rollers (mm): **40** Height (mm): **20,44**
 a (mm): **10**

Displacement (mm)	Load (KN)	Bending strength (MPa)	Strain (%)
0	0,003157	0,012	0
0,002	0,015083	0,057	0,015
0,012	0,055486	0,208	0,092
0,021	0,112927	0,423	0,161
0,031	0,178399	0,669	0,238
0,04	0,245089	0,919	0,307
0,05	0,312752	1,172	0,383
0,06	0,380901	1,428	0,460
0,07	0,448564	1,681	0,537
0,08	0,514767	1,929	0,613
0,298	0,019464	0,073	2,284

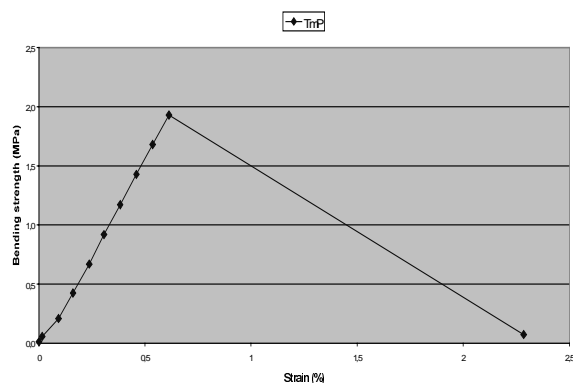


Fyrpunktsböjtest (forts)

SIZE OF THE TEST RIGG: SAMPLE: RmC – Provstav nr 7

Load rollers (mm): 20 Width (mm): 19,42
Support rollers (mm): 40 Height (mm): 19,92
a (mm): 10

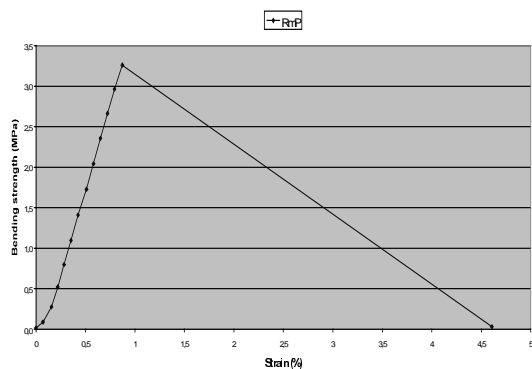
Displacement (mm)	Load (KN)	Bending strength (MPa)	Strain (%)
0	0,002914	0,011	0
0,002	0,005591	0,022	0,015
0,002	0,007295	0,028	0,015
0,019	0,012406	0,048	0,142
0,063	0,021412	0,083	0,471
0,086	0,03066	0,119	0,642
0,101	0,057434	0,224	0,754
0,115	0,093942	0,366	0,859
0,128	0,13824	0,538	0,956
0,14	0,188622	0,734	1,046
0,155	0,242411	0,944	1,158
0,166	0,298392	1,162	1,240
0,177	0,357292	1,391	1,322
0,188	0,41741	1,625	1,404
0,2	0,477771	1,860	1,494
0,21	0,537889	2,094	1,569
0,221	0,597277	2,325	1,651
0,231	0,656421	2,556	1,726
0,242	0,714105	2,780	1,808
0,743	0,006565	0,026	5,550



SIZE OF THE TEST RIGG: SAMPLE: RmP – Provstav nr 8

Load rollers (mm): 20 Width (mm): 18,19
Support rollers (mm): 40 Height (mm): 18,9
a (mm): 10

Displacement (mm)	Load (KN)	Bending strength (MPa)	Strain (%)
0	0,003401	0,016	0
0,01	0,019464	0,090	0,071
0,022	0,060111	0,278	0,156
0,031	0,11317	0,523	0,220
0,04	0,173045	0,799	0,284
0,05	0,237544	1,097	0,354
0,06	0,30545	1,410	0,425
0,072	0,374086	1,727	0,510
0,082	0,44248	2,043	0,581
0,092	0,510386	2,356	0,652
0,102	0,576832	2,663	0,723
0,112	0,642061	2,964	0,794
0,123	0,706073	3,260	0,872
0,65	0,007051	0,033	4,607



Fyrpunktsböjtester (forts)

SIZE OF THE TEST RIGG: SAMPLE: **AmC – Provstav nr 9**

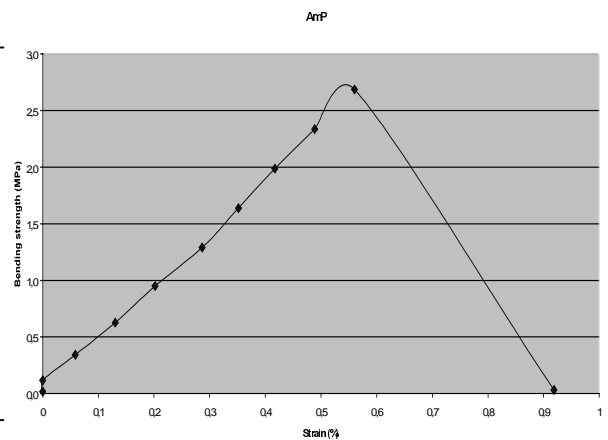
Load rollers (mm): **20** Width (mm): **19,35**
 Support rollers (mm): **40** Height (mm): **19,18**
 a (mm): **10**

Displacement (mm)	Load (KN)	Bending strength (MPa)	Strain (%)
0	0,003401	0,014	0
0,008	0,009729	0,041	0,058
0,023	0,023359	0,098	0,165
0,038	0,040396	0,170	0,273
0,051	0,063762	0,269	0,367
0,063	0,088588	0,373	0,453
0,074	0,112684	0,475	0,532
0,083	0,137023	0,577	0,597
0,09	0,163309	0,688	0,647
0,097	0,192029	0,809	0,698
0,103	0,221723	0,934	0,741
0,111	0,252147	1,063	0,798
0,118	0,286709	1,208	0,849
0,126	0,326138	1,375	0,906
0,134	0,371653	1,566	0,964
0,144	0,425442	1,793	1,036
0,155	0,482153	2,032	1,115
0,168	0,539836	2,275	1,208
0,179	0,598737	2,523	1,287
0,418	0,005104	0,022	3,006

SIZE OF THE TEST RIGG: SAMPLE: **AmP – Provstav nr 10**

Load rollers (mm): **20** Width (mm): **18,96**
 Support rollers (mm): **40** Height (mm): **17,37**
 a (mm): **10**

Displacement (mm)	Load (KN)	Bending strength (MPa)	Strain (%)
0	0,003401	0,018	0
0	0,022142	0,116	0,000
0,009	0,065222	0,342	0,059
0,02	0,119499	0,627	0,130
0,031	0,181077	0,950	0,202
0,044	0,246062	1,290	0,287
0,054	0,312265	1,638	0,352
0,064	0,378954	1,987	0,417
0,075	0,4454	2,336	0,489
0,086	0,512333	2,687	0,560
0,141	0,005835	0,031	0,918



Fyrpunktsböjtest (forts)

SIZE OF THE TEST RIGG: SAMPLE: **TnsP – Provstav nr 11**

Load rollers (mm): 20 **Width (mm): 17,39**
Support rollers (mm): 40 **Height (mm): 19,46**
a (mm): 10

Displacement (mm)	Load (KN)	Bending strength (MPa)	Strain (%)
0	0,008999	0,041	0
0,007	0,029444	0,134	0,051
0,019	0,063762	0,290	0,139
0,032	0,101731	0,463	0,234
0,045	0,144568	0,659	0,328
0,058	0,186918	0,852	0,423
0,072	0,231215	1,053	0,525
0,094	0,262856	1,197	0,686
0,219	0,048185	0,220	1,598

SIZE OF THE TEST RIGG: SAMPLE: **RnsC – Provstav nr 12**

Load rollers (mm): 20 **Width (mm): 19,05**
Support rollers (mm): 40 **Height (mm): 18,04**
a (mm): 10

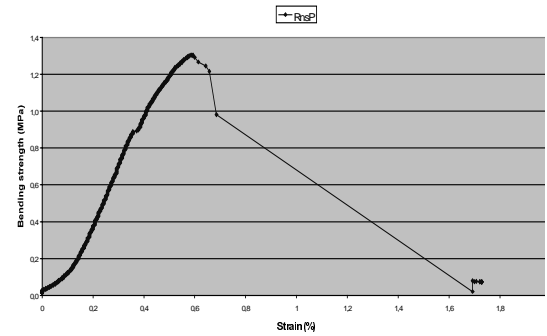
Displacement (mm)	Load (KN)	Bending strength (MPa)	Strain (%)
0	0,005591	0,027	0
0,008	0,026279	0,127	0,054
0,018	0,080069	0,387	0,122
0,028	0,143594	0,695	0,189
0,037	0,210284	1,018	0,250
0,048	0,276243	1,337	0,325
0,06	0,342202	1,656	0,406
0,219	0,002184	0,011	1,482

Fyrpunktsböjtester (forts)

SIZE OF THE TEST RIGG: SAMPLE: **RnsP – Provstav nr 13**

Load rollers (mm): **20** Width (mm): **18,74**
 Support rollers (mm): **40** Height (mm): **19,04**
 a (mm): **10**

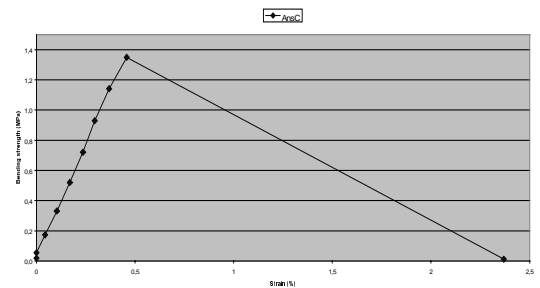
Displacement (mm)	Load (KN)	Bending strength (MPa)	Strain (%)
0	0,003401	0,015	0
0,007	0,01484	0,066	0,050
0,02	0,048428	0,214	0,143
0,031	0,09808	0,433	0,221
0,041	0,150896	0,666	0,293
0,053	0,205416	0,907	0,378
0,066	0,256285	1,132	0,471
0,082	0,295471	1,305	0,585
0,242	0,016544	0,073	1,728



SIZE OF THE TEST RIGG: SAMPLE: **AnsC – Provstav nr 14**

Load rollers (mm): **20** Width (mm): **20,76**
 Support rollers (mm): **40** Height (mm): **19,68**
 a (mm): **10**

Displacement (mm)	Load (KN)	Bending strength (MPa)	Strain (%)
0	0,004861	0,018	0
0	0,014597	0,054	0,000
0,006	0,046238	0,173	0,044
0,014	0,088831	0,331	0,103
0,023	0,139213	0,519	0,170
0,032	0,193003	0,720	0,236
0,04	0,248983	0,929	0,295
0,05	0,305937	1,141	0,369
0,062	0,361674	1,349	0,458
0,321	0,003157	0,012	2,369

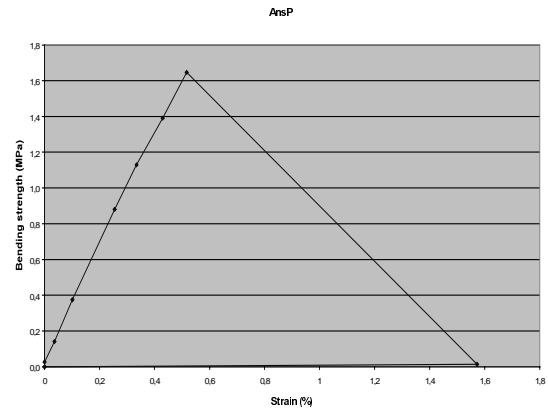


Fyrpunktsböjtester (forts)

SIZE OF THE TEST RIGG: SAMPLE: **AnsP – Provstav nr 15**

Load rollers (mm): 20 Width (mm): 17,8
 Support rollers (mm): 40 Height (mm): 19,41
 a (mm): 10

Displacement (mm)	Load (KN)	Bending strength (MPa)	Strain (%)
0	0,006078	0,027	0
0,005	0,031391	0,140	0,036
0,014	0,08372	0,375	0,102
0,035	0,196897	0,881	0,255
0,046	0,252391	1,129	0,335
0,059	0,310805	1,390	0,429
0,071	0,368245	1,647	0,517
0,216	0,002914	0,013	1,572



SIZE OF THE TEST RIGG: SAMPLE: **TmC – Provstav nr 16**

Load rollers (mm): 20 Width (mm): 19,46
 Support rollers (mm): 40 Height (mm): 18,6
 a (mm): 10

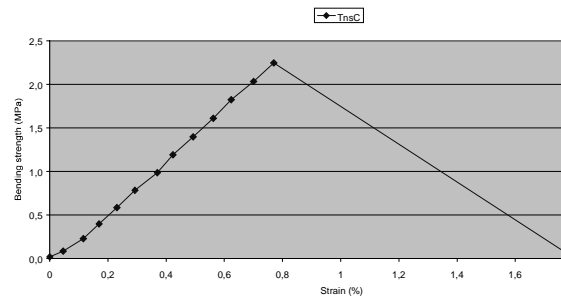
Displacement (mm)	Load (KN)	Bending strength (MPa)	Strain (%)
0	0,000967	0,004	0,000
0,046	0,01484	0,066	0,321
0,056	0,058407	0,260	0,391
0,059	0,078365	0,349	0,412
0,072	0,174018	0,775	0,502
0,086	0,278433	1,241	0,600
0,105	0,398426	1,775	0,732
0,121	0,530831	2,365	0,844
0,14	0,658612	2,935	0,977
0,158	0,781768	3,484	1,102
0,433	0,147489	0,657	3,020

Fyrapunktsböjtester (forts)

SIZE OF THE TEST RIGG: SAMPLE: **TnsC – Provstav nr 17**

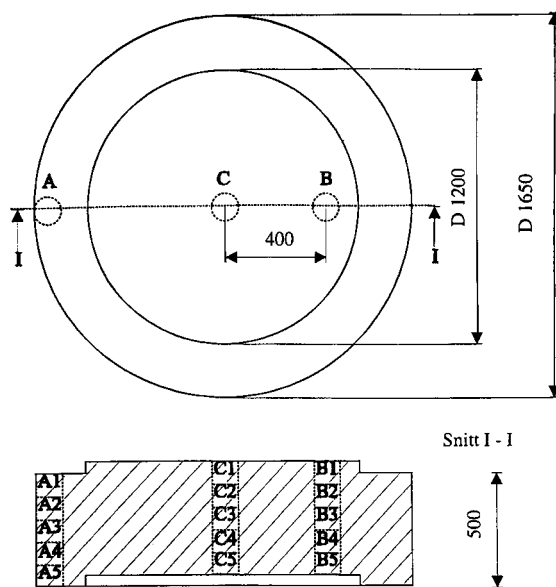
Load rollers (mm): **20** Width (mm): **20,51**
 Support rollers (mm): **40** Height (mm): **20,54**
 a (mm): **10**

Displacement (mm)	Load (KN)	Bending strength (MPa)	Strain (%)
0	0,004861	0,017	0
0,006	0,024089	0,084	0,046
0,015	0,065222	0,226	0,116
0,022	0,114387	0,397	0,169
0,03	0,168177	0,583	0,231
0,038	0,225374	0,781	0,293
0,048	0,283788	0,984	0,370
0,055	0,343419	1,191	0,424
0,064	0,403294	1,398	0,493
0,073	0,464385	1,610	0,562
0,081	0,52572	1,823	0,624
0,091	0,586811	2,034	0,701
0,1	0,647902	2,246	0,770
0,233	0,005591	0,019	1,795

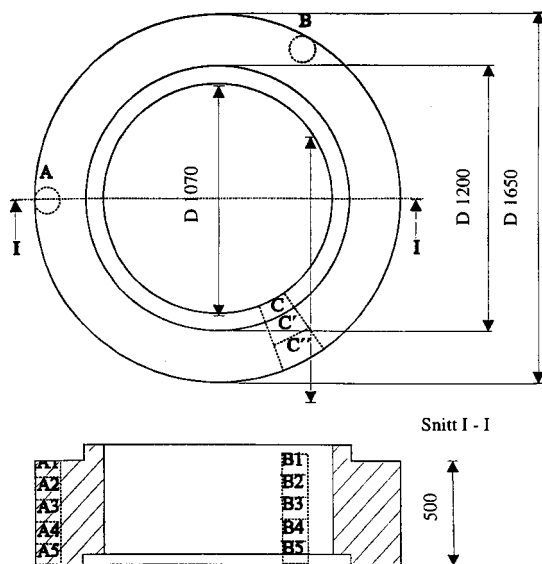


Trepunktsböjtest

Lokalisering av provkroppar



Figur B3-1. Provtagningspunkternas läge i ett "ostformat" block.



Figur B3-2. Provtagningspunkternas läge i ett ringformat block.

Trepunktsböjtest

Primärdata för de provkroppar som använts i trepunktsböjtesterna

Prov	Vattenkvot (w)	Densitet (ρ) (g/cm^3)
C'1	0,162231	2,101645
C''3	0,163859	2,100572
C5	0,158226	2,101525
C'2	0,161717	2,109116
B4	0,162799	2,101211
C1	0,162284	2,099906
A4	0,16478	2,095965
C'5	0,157208	2,106865
A2	0,165079	2,101841
B2	0,163853	2,099513
C''5	0,15942	2,098218
B3	0,160991	2,091265
C''1	0,161366	2,112994
C'4	0,163821	2,106537
C''4	0,163012	2,101419
C2	0,163405	2,101989
C''2	0,162114	2,106917
A3	0,162767	2,100071
C3	0,163909	2,105596
A1	0,16306	2,097344
C'3	0,163722	2,105457
C4	0,162964	2,106616
A5	0,164298	2,098074
B1	0,16009	2,090961
B5	0,160057	2,092581

Bestämning av tvärkontraktionstalet och elasticitetsmodul hos kompakterade bentonitblock

1 Bakgrund och syfte

Enligt det svenska konceptet för förvaring av utbränt kärnbränsle, KBS-3, är kopparkapseln omgärdad av högkompakterad bentonit. En teknik för exaxlig kompaktering av stora bentonitblock har tagits fram. Denna är beskriven i referenserna /B5-1/ och /B5-2/.

En elastisk FEM-beräkning av olika lastfall som ett stort bentonitblock kan utsättas för under hantering och deponering kräver kunskap om det pressade blockets elasticitetsmodul (E) och tvärkontraktionstal (ν). Syftet med detta projekt var att bestämma dessa parametrar i laboratorieförsök.

2 Genomförande

Två olika typer av provkroppar (kvadratisk prisma) sågades ut ur bentonitblock med två olika vattenkvoter (Se tabell 2-1 nedan). Proverna monterades i en press och trycktes ihop elastiskt under konstant deformationshastighet. Under försöket mättes kontinuerligt pålagd vertikal last, den vertikala deformationen samt provets deformation vinkelrätt pressriktningen (totalt fyra mätare). I figur B5-1 nedan visas en schematisk bild av provet i pressen. Från de mätta parametrarna kan både E -modulen och tvärkontraktionstalet för proverna beräknas. E -modulen kan beräknas med följande uttryck:

$$E = \frac{\Delta\sigma_v}{\Delta\varepsilon_v} = \frac{\Delta P \times L}{A \times \Delta L} \quad (2-1)$$

där

- E = Elasticitetsmodul (kPa)
- $\Delta\sigma_v$ = Vertikala spänningen på provet (kPa)
- $\Delta\varepsilon_v$ = Vertikala töjningen av provet
- ΔP = Pålagd last (kN)
- L = Provets höjd (m)
- ΔL = Ändring i provets längd (m)
- A = Provets tvärsnittsarea (m²)

Tvärkontraktionstalet kan beräknas med följande ekvation

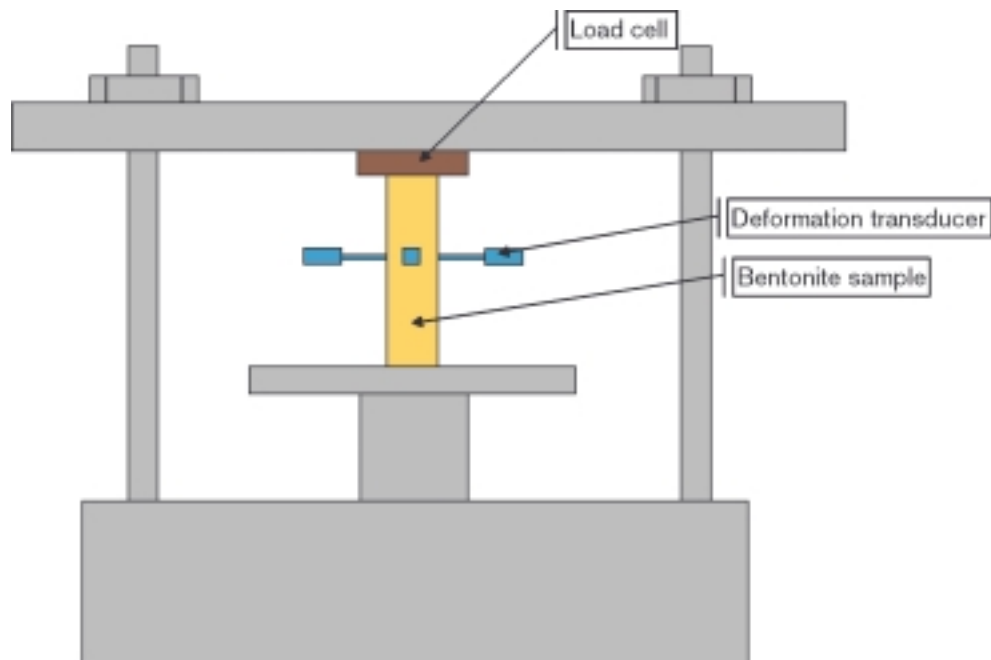
$$\nu = -\frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_v} = \frac{\Delta B \times L}{B \times \Delta L} \quad (2-2)$$

där

- ε_v = Vertikala töjningen av provet
- ε_h = Horisontella töjningen av provet
- L = Provets höjd (m)
- ΔL = Ändring i provets längd (m)
- B = Provets bredd (m)
- ΔB = Ändring i provets bredd (m)

Tabell 2-1. Dimensioner, vattenkvot (w), densitet (ρ), portal (e) och vattenmättnadsgrad (Sr) hos de provkroppar som använts i proven.

Prov nr	Höjd (mm)	Bredd (mm)	w	ρ (kg/m ³)	e	Sr
1	40	40	0,121	2121	0,469	0,717
2	100	40	0,121	2117	0,472	0,713
3	40	40	0,162	2087	0,547	0,821
4	100	40	0,163	2104	0,537	0,844



Figur B5-1. Schematisk uppställning för mätning av E-modul och tvärkontraktionstal hos bentonitblock.

3 Testresultat och slutsatser

I figurerna B5-2, B5-3, B5-4 och B5-5 är resultaten från proverna 1–4 uppritade. Lutningarna på de heldragna linjerna har använts för att utvärdera elasticitetsmodulen respektive tvärkontraktionstalet. Vid utvärdering av tvärkontraktionstalet har två bestämningar av töjningen i breddriktningen utnyttjats. I tabellen nedan är de utvärderade parametrarna redovisade för de fyra proverna.

Av proverna kan följande observationer göras:

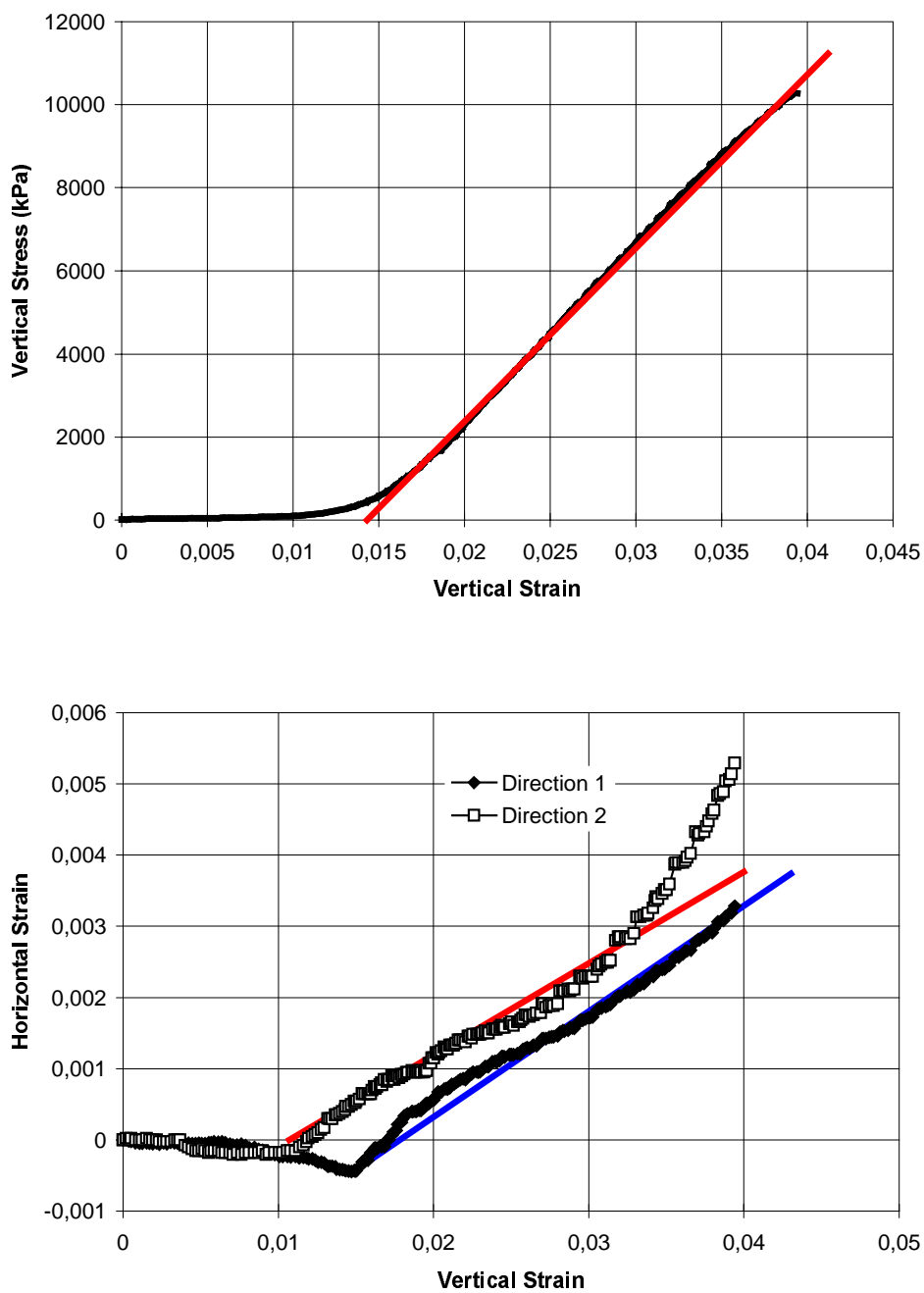
- Elasticitetsmodulen (E-modul) är högre för provkropparna med låg vattenkvot.
- De beräknade E-modulerna är lägre för de låga provkropparna jämfört med de höga provkropparna.
- Tvärkontraktionstalet är högre för proverna med hög vattenkvot.
- De beräknade tvärkontraktionstalen är lägre för de lägre provkropparna.

Tabell 3-1. Utvärderade elasticitetsmoduler och tvärkontraktionstal.

Nr	Vattenkvot (%)	Densitet (g/cm ³)	Längd (mm)	Bredd I (mm)	Bredd II (mm)	E-modul (MPa)	Tvärk-tal ¹⁾
1	12,1	2,12	39,6	39,5	39,5	417,5	0,14
2	12,1	2,12	90,7	39,5	39,6	609,4	0,17
3	16,2	2,09	39,5	38,7	39,6	321,7	0,21
4	16,3	2,10	112,9	38,7	38,9	389,0	0,27

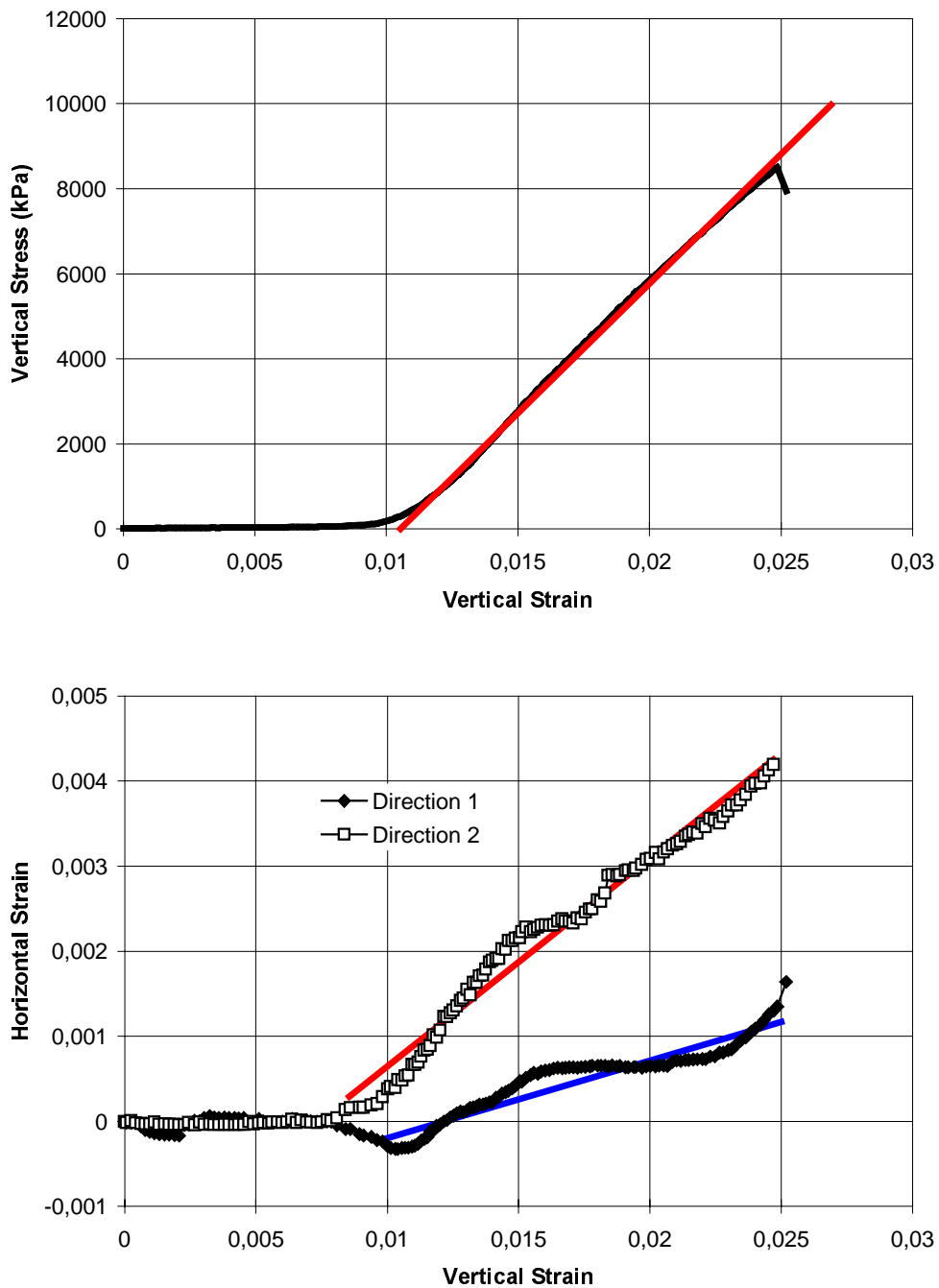
¹⁾ Utvärderat som ett medeltal av två bestämningar.

Prov 1



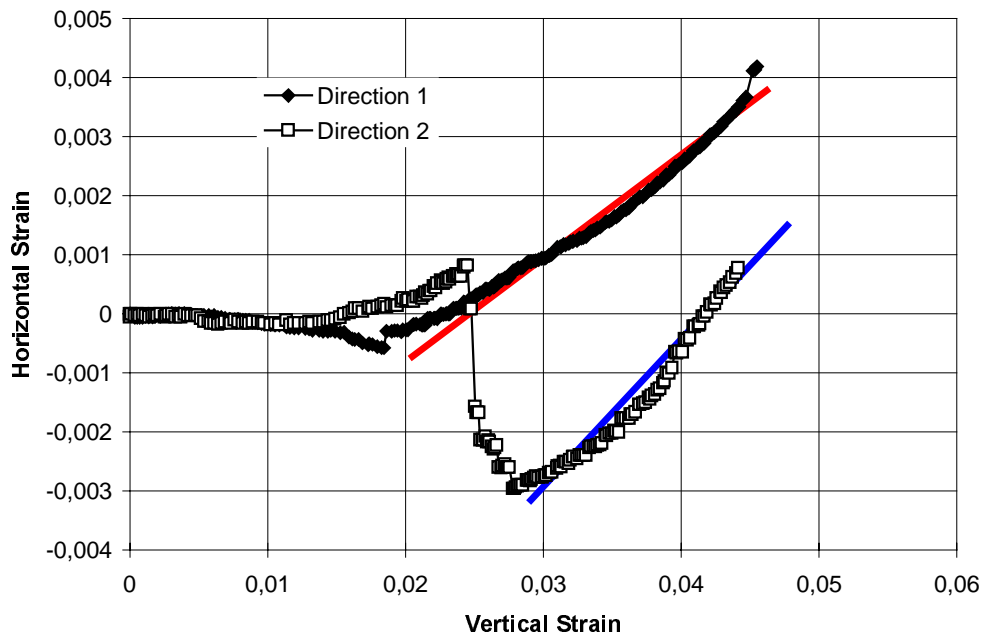
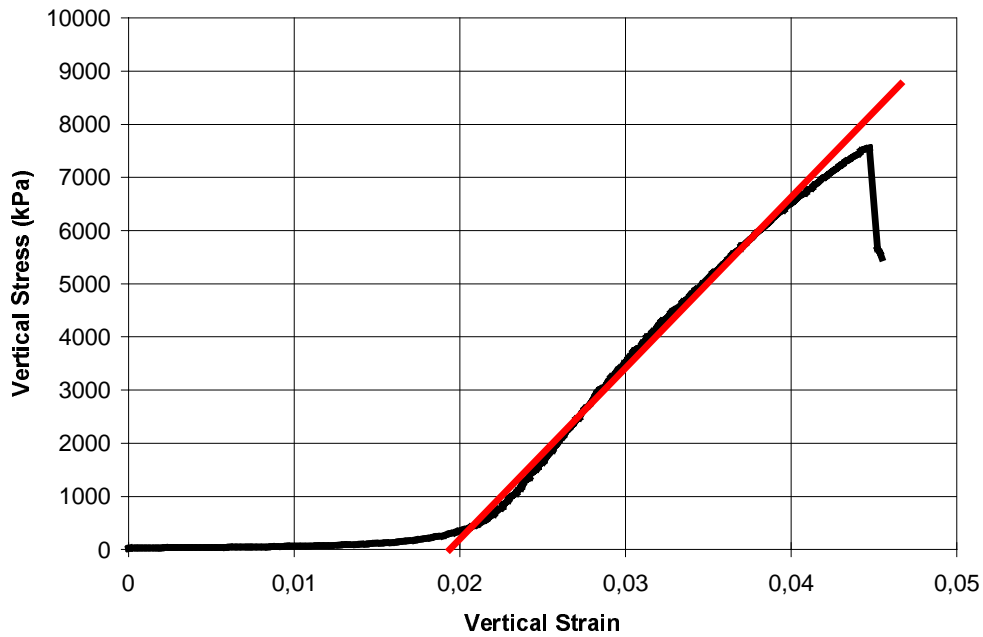
Figur B5-2. Pålagd spänning (a) och horisontell töjning (b) ritad som funktion av provets vertikala töjning. De heldragna linjernas lutning har använts för att utvärdera Elasticitetsmodul och tvärkontraktionstal. Resultaten kommer från prov 1.

Prov 2



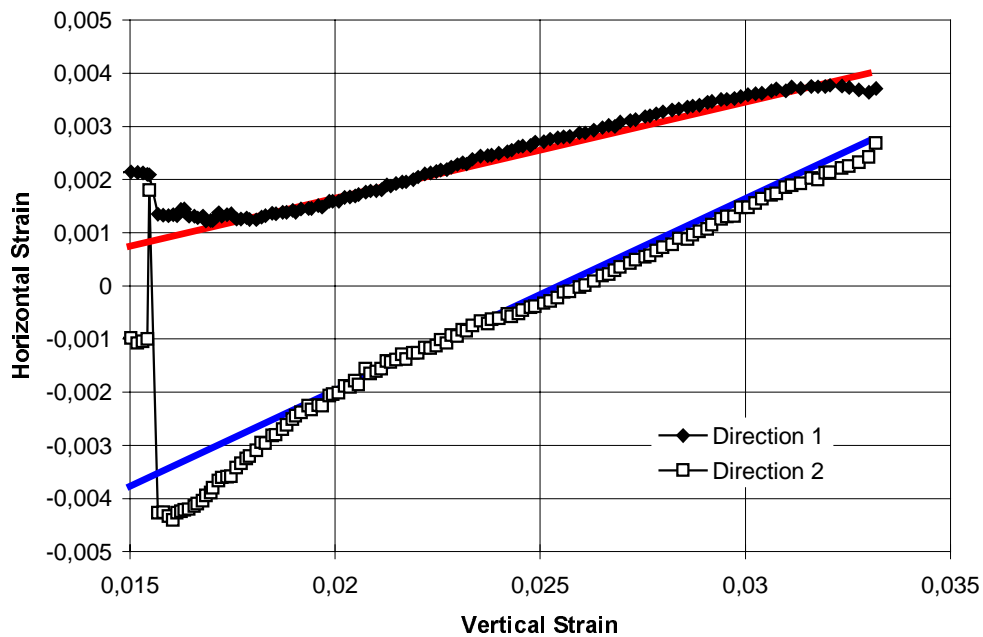
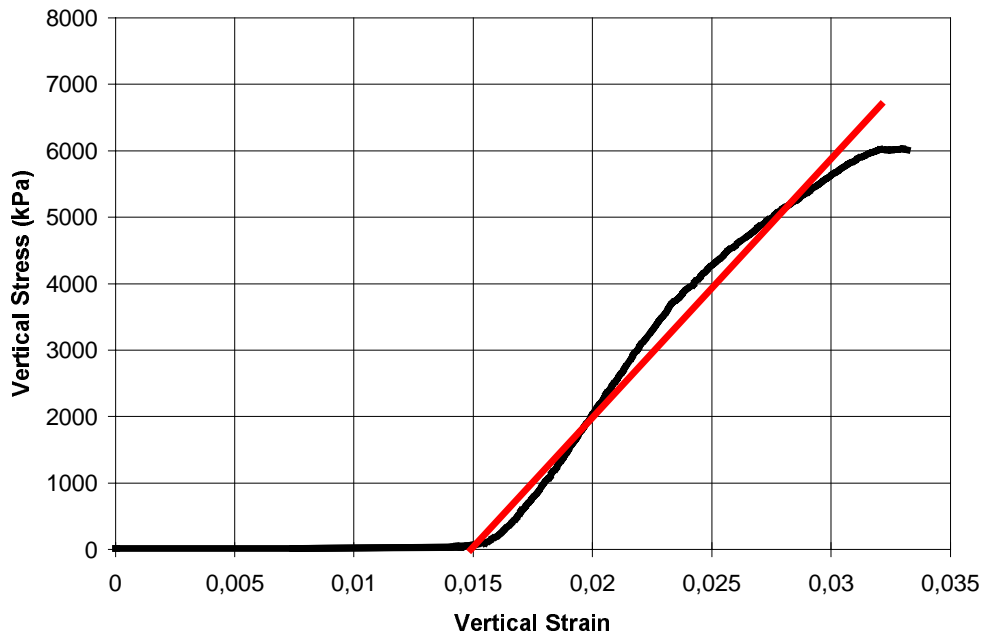
Figur B5-3. Pålagd spänning (a) och horisontell töjning (b) ritad som funktion av provets vertikala töjning. De heldragna linjernas lutning har använts för att utvärdera Elasticitetsmodul och tvärkontraktionstal. Resultaten kommer från prov 2.

Prov 3



Figur B5-4. Pålagd spänning (a) och horisontell töjning (b) ritad som funktion av provets vertikala töjning. De heldragna linjernas lutning har använts för att utvärdera Elasticitetsmodul och tvärkontraktionstal. Resultaten kommer från prov 3.

Prov 4



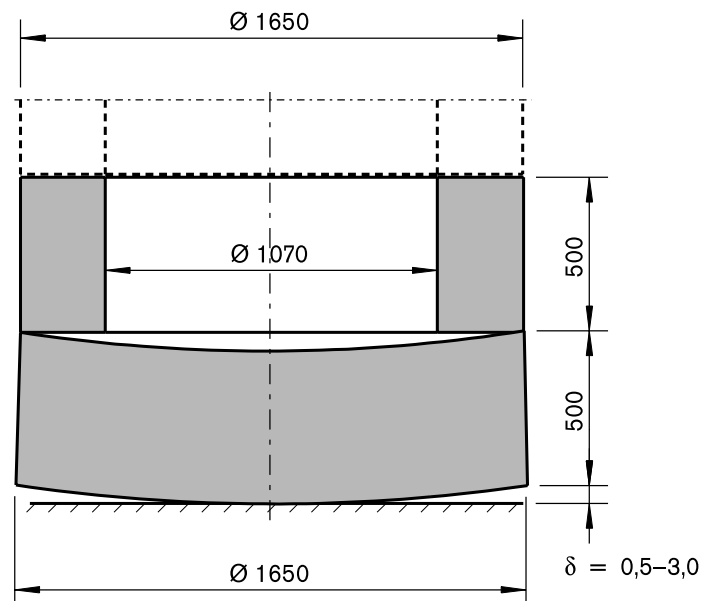
Figur B5-5. Pålagd spänning (a) och horisontell töjning (b) ritad som funktion av provets vertikala töjning. De heldragna linjernas lutning har använts för att utvärdera Elasticitetsmodul och tvärkontraktionstal. Resultaten kommer från prov 4.

Hållfasthetsberäkning för bentonitblock med planhetsfel

1 Sammanfattning

1.1 Bakgrund och syfte

Enaxligt pressade cylinderformade bentonitblock uppvisar ofta en avvikelse från den tänkta formen. Ovansidan och undersidan är inte helt plana utan sfäriskt konkava respektive konvexa. Om man tänker sig att underlaget är plant så vilar endast området närmast centrum på underlaget. Då ”ananasringarna” av bentonit staplas på blocket vid bildandet av en buffert, så utsätts blocket för en axiellast längs periferin som ger ringböjning (vrängningstendenser) i blocket. Syftet med denna beräkning är att bestämma påkänningarna vid olika värde på planhetsfelet i bentonitblocket och jämföra det med hållfasthetsvärden. Belastningsprincipen visas i figur B6-1 där planhetsfelet är starkt överdrivet.



Figur B6-1. Geometri med planhetsfel.

1.2 Resultat

Vid pålastning av ett icke plant bentonitblock som vilar på en stel, plan yta, så blev den högsta dragspänningen 0,74 MPa. Detta kan jämföras med dragbrotthållfastheten som uppgår till ca 2 MPa. Det cirkulära spår som finns på blockets ovansida för kapselns fläns medför dock lokalt högre spänningsnivåer än de här framräknade. Denna spänningsförhöjning beror av spårdjup och hålkälsradie.

2 Beräkning

2.1 Förutsättningar

Materialdata

Den pressade bentoniten betraktas som ortotrop. Det innebär att elasticitetsmodulen i radiell led och axiell led är olika. Olika källor anger olika värden och resultatet i denna beräkning är beroende av vilka värden som väljs. Denna beräkning baseras på värden som uppmätts av CLAY Technology AB och redovisas i bilaga 5. Eftersom orienteringen av provkroppen i ursprungsblocket är osäker så förutsätts i denna beräkning, trots bentonitens ortotropa tendenser, att elasticitetsmodulen i olika riktningar är densamma. De använda värdena är:

$$E_{\text{radiell}} = E_{\text{axiell}} = 321,7 \text{ N/mm}^2$$

Uppmätt tvärkontraktionstal $\nu = 0,21$

Densitet $\rho = 2087 \text{ kg / m}^3$

Geometri

Blocket och ringarnas dimensioner visas i figur B6-1. Blockets planhetsfel vid ytterradien antas ligga mellan 0,5 och 3,0 mm. Ringarna antas vara plana.

Blockets spår:

Det ringformade spåret på blockets ovansida för kapselns fläns ingår inte i modellen utan endast resultatet för grundspänningen erhålles och redovisas.

2.2 FEM-modell

Beräkningen har utförts med hjälp av FEM-programmet ANSYS. En principmodell visas på nästa sida hos vilken planhetsfelet är starkt överdrivet. Modellen innehåller kontaktytor som medger förändring av storleken hos stödytor och lastytor då lasten ändras. Omgivningens kontaktyta det vill säga den understa ytan betraktas som stel.

Den understa ringen finns med i modellen så att denna genom sin deformation kan ge riktig lasttryckfördelning. Inverkan av övriga ringar erhålles genom att gradvis öka viktstrycket på den modellerade ringens ovansida.

2.3 Resultat

Påkänningar

I figur B6-3 till B6-14 visas erhållna axiella respektive radiella spänningsfördelningar. Dessa ges för några ytterlighetsfall vad gäller planhetsfel och belastning av ringar och kapsel. En axiell spänningsfördelning visas för att man ska kunna få en uppfattning om kontaktytornas storlek.

I nedanstående tabell sammanfattas spänningsresultaten.

Planhetsfel (δ) (mm)	Belastning	Max. axiell dragspänning (MPa)	Max. radiell dragspänning (MPa)
0,5	1 ring	0,02	0,05
0,5	12 ringar	0,05	0,18
0,5	12 ringar + kapsel	0,06	0,30
3,0	1 ring	0,03	0,13
3,0	12 ringar	0,16	0,58
3,0	12 ringar + kapsel	0,13	0,42

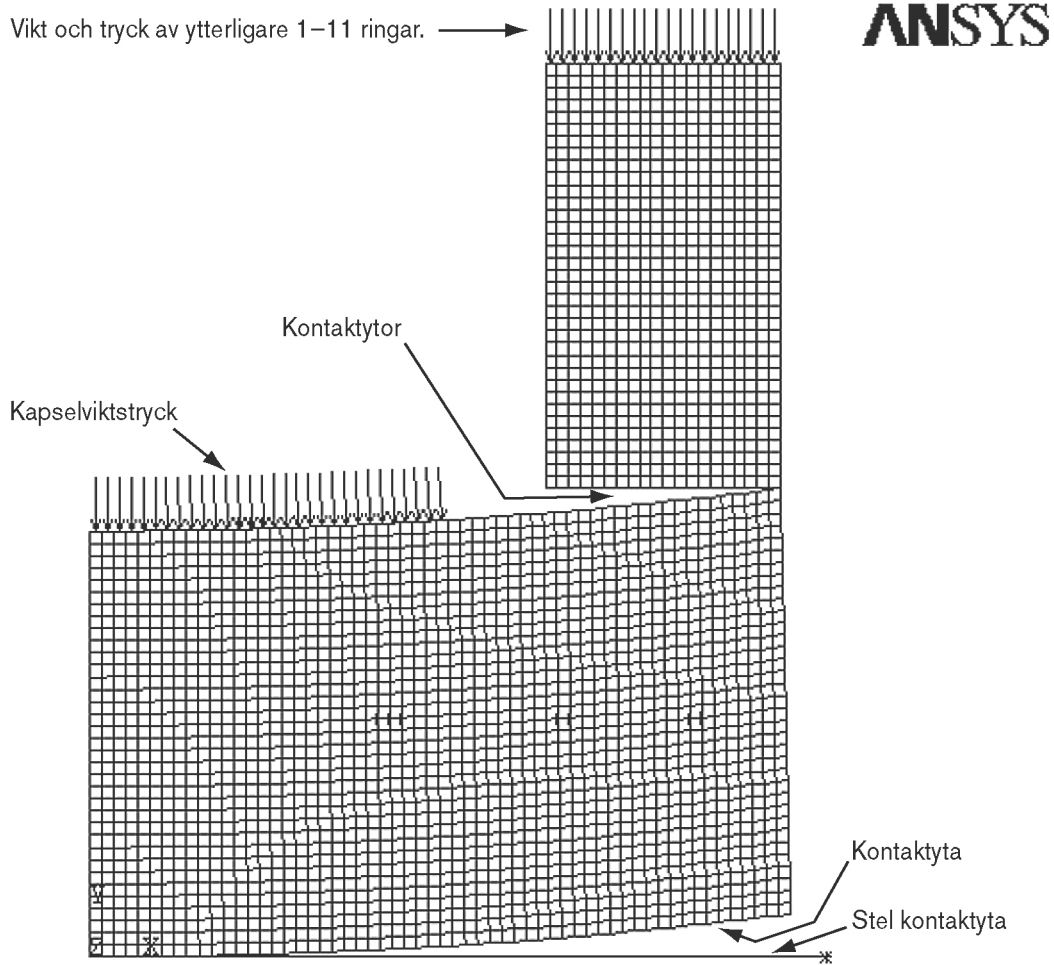
Utvärdering

Ovanstående resultat kan jämföras med dragbrothållfastheten för pressad bentonit. Vi har då sett värden vid ca 2 MPa. Detta är då högre än framräknade påkänningar. Mot detta kan ges bland annat följande reservationer:

Det cirkulära spår som finns på blockets ovansida kan ge lokala spänningsförhöjningar som överskrider dragbrothållfastheten.

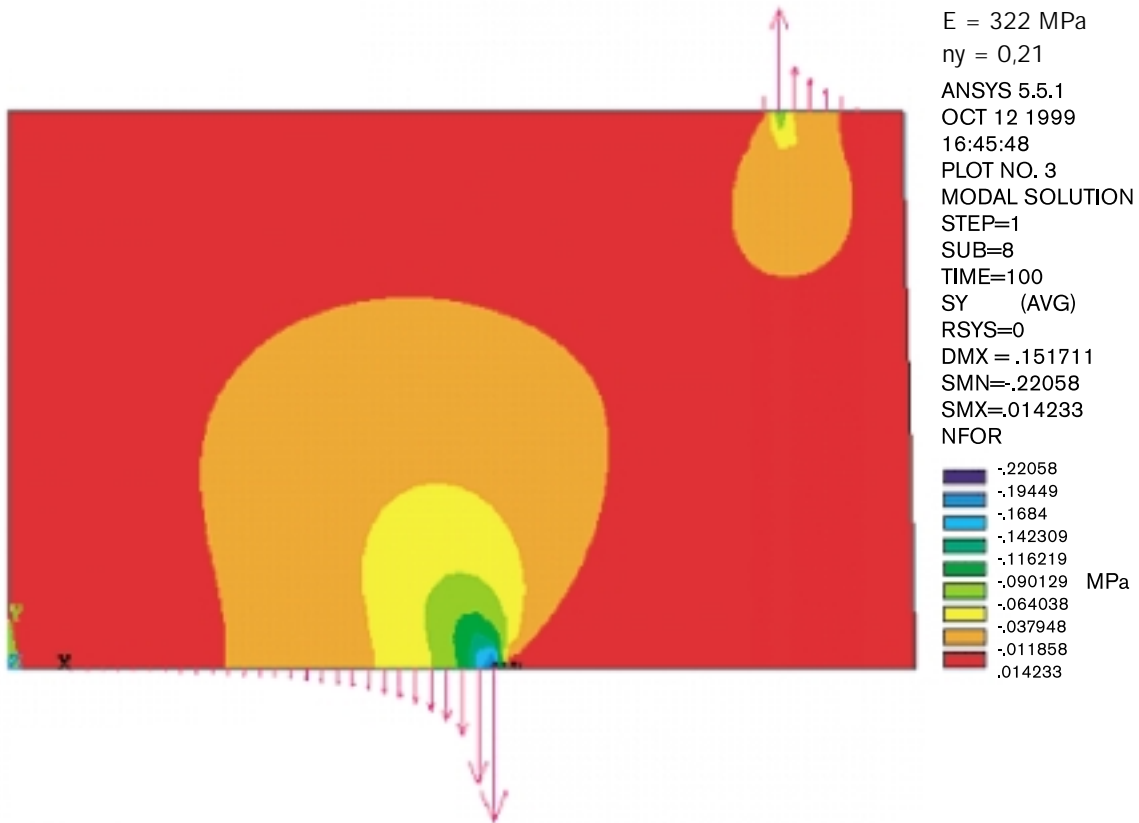
Ändrade värden på elasticitetsmodulerna ger andra resultat. En högre elasticitetsmodul i axiell led ger en bottenkontaktyta med mindre radie vilket ger större böjmoment. Om detta kombineras med en lägre elasticitetsmodul i tangentiell led (som antas vara likvärdig med den radiella) så erhålles en lägre mothållande kraft i ringled, vilken motverkar vrängning av denna skålformade geometri.

Principmodell för FEM-modellering



Modellprincip vid starkt uppskalad planavvikelse.

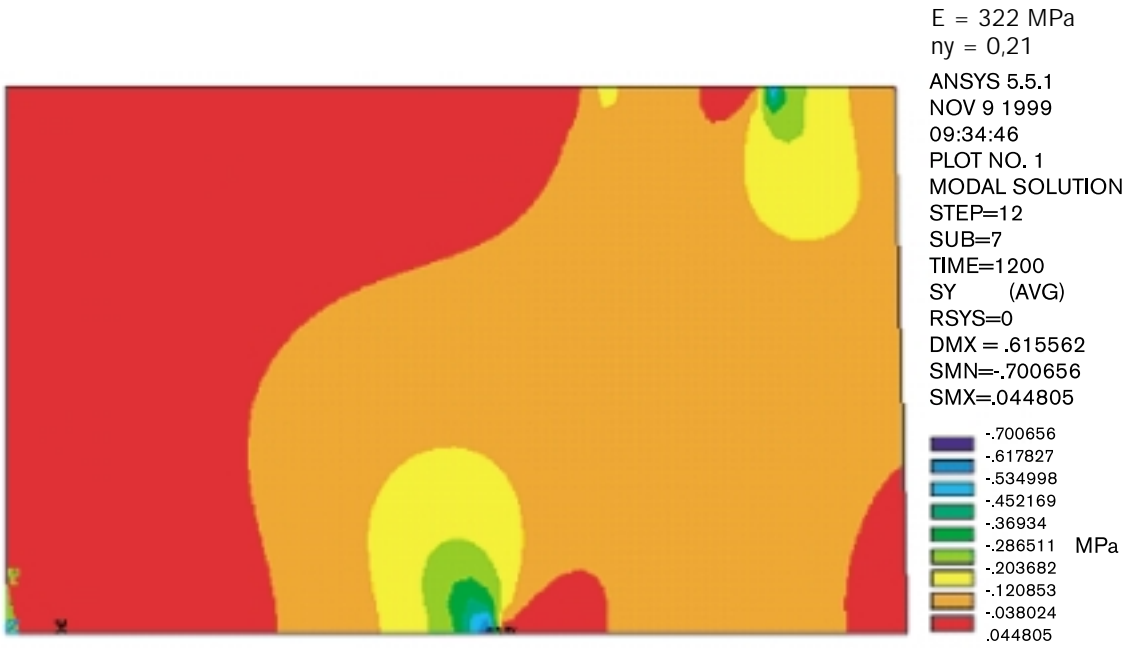
Figur B6-2. Principmodell för FEM-modelleringen.



Figur B6-3. Axiell spänningsfördelning vid planavvikelse = 0,5 mm och last = 1 ring.



Figur B6-4. Radiell spänningsfördelning vid planavvikelse = 0,5 mm och last = 1 ring.



Figur B6-5. Axiell spänningsfördelning vid planavvikelse = 0,5 mm och last = 12 ringar.



Figur B6-6. Radiell spänningsfördelning vid planavvikelse = 0,5 mm och last = 12 ringar.



Figur B6-7. Axiell spänningsfördelning vid planavvikelse = 0,5 mm och last = 12 ringar + kapsel-vikt.



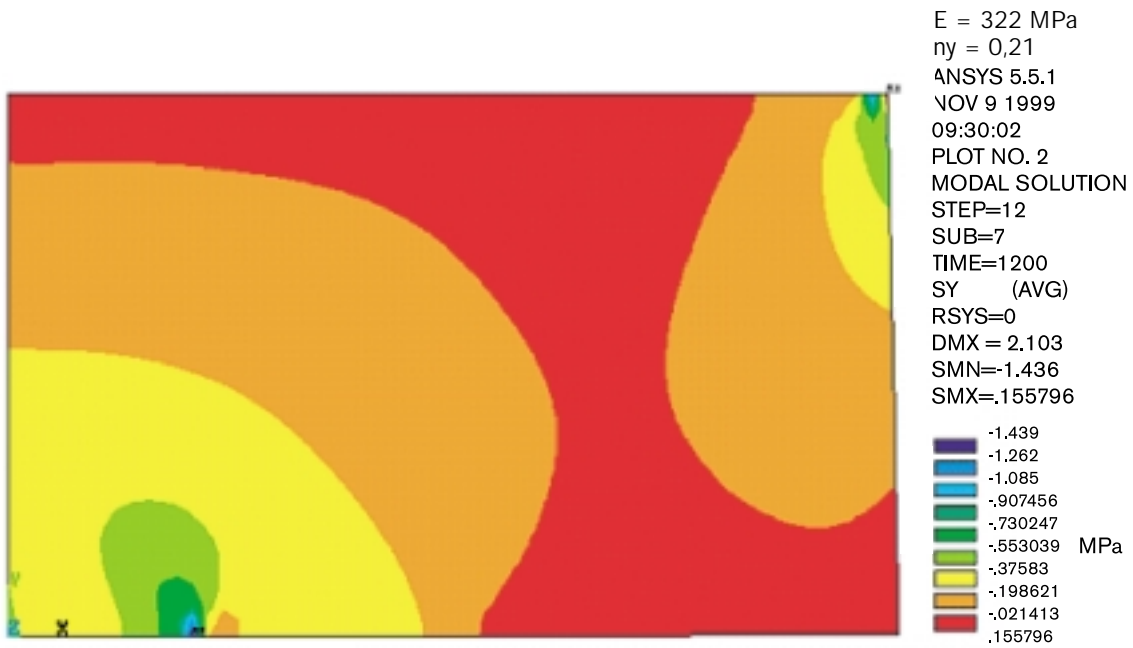
Figur B6-8. Radiell spänningsfördelning vid planavvikelse = 0,5 mm och last = 12 ringar + kapsel-vikt.



Figur B6-9. Axiell spänningsfördelning vid planavvikelse = 3 mm och last = 1 ring.



Figur B6-10. Radiell spänningsfördelning vid planavvikelse = 3 mm och last = 1 ring.



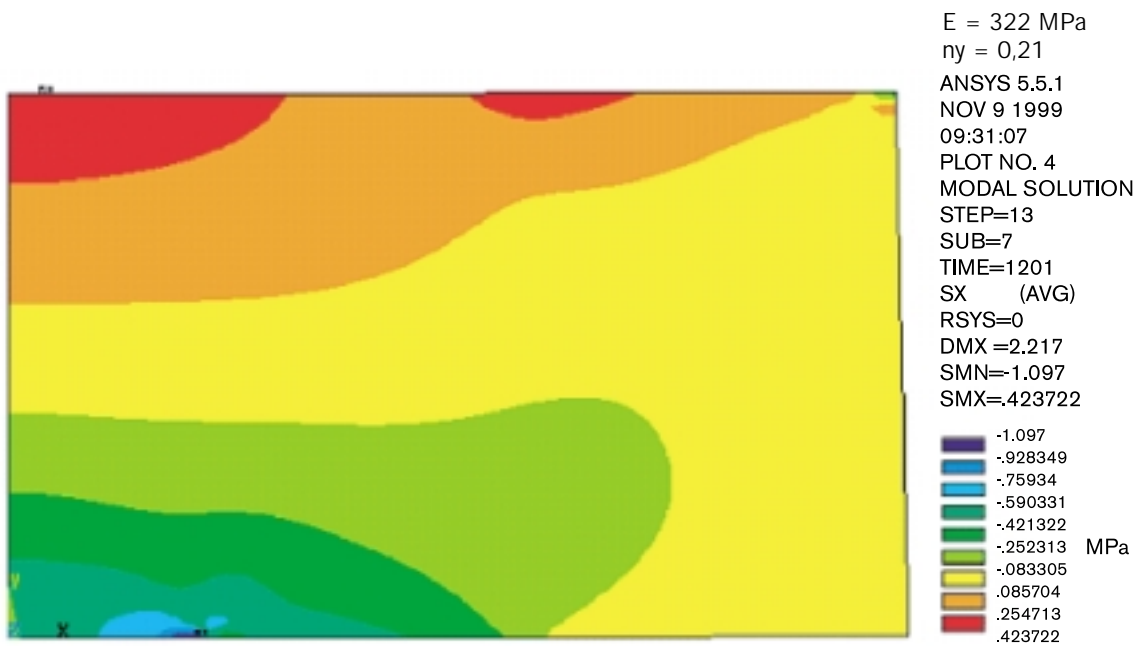
Figur B6-11. Axiell spänningsfördelning vid planavvikelse = 3 mm och last = 12 ringar.



Figur B6-12. Radiell spänningsfördelning vid planavvikelse = 3 mm och last = 12 ringar.



Figur B6-13. Axiell spänningsfördelning vid planavvikelse = 3 mm och last = 12 ringar + kapselvikt.



Figur B6-14. Radiell spänningsfördelning vid planavvikelse = 3 mm och last = 12 ringar + kapselvikt.

Referenser

Bilaga 5

- B5-1 **Johannesson L-E, Börjesson L, 1998.** Compaction of bentonite blocks. Development of techniques for production of blocks with different shapes and sizes. SKB R-99-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- B5-2 **Johannesson L-E, 1999.** Compaction of full size blocks of bentonite for the KBS-3 concept. Initial tests for evaluating the technique. SKB R-99-66, Svensk Kärnbränslehantering AB.