LUND UNIVERSITY

Frostbeständigheten hos armerade betongbalkar förstärkta med kolfiberkomposit

Hassanzadeh, Manouchehr

2002

Link to publication

Citation for published version (APA):
Hassanzadeh, M. (2002). *Frostbeständigheten hos armerade betongbalkar förstärkta med kolfiberkomposit*. (Rapport TVBM; Vol. 3102). Avd Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola.

Total number of authors:
1

General rights
Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.
• Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
• You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
• You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: https://creativecommons.org/licenses/

Take down policy
If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

Download date: 04. Jul. 2025

LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA
LUNDS UNIVERSITET

Avd Byggnadsmaterial

FROSTBESTÄNDIGHETEN HOS ARMERADE BETONGBALKAR FÖRSTÄRKTA MED KOLFIBER-KOMPOSIT

Manouchehr Hassanzadeh

TVBM-3102 Lund 2002

LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA
LUNDS UNIVERSITET

Avd Byggnadsmaterial

FROSTBESTÄNDIGHETEN HOS ARMERADE BETONGBALKAR FÖRSTÄRKTA MED KOLFIBER-KOMPOSIT

Manouchehr Hassanzadeh

TVBM-3102 Lund 2002

ISRN: LUTVDG/TVBM--02/3102--SE (1-38)

ISSN: 0348-7911 TVBM

Lunds Tekniska Högskola
Byggnadsmaterial
Box 118

221 00 LUND

Tel: 046-2227415
Fax: 046-2224427
www.byggnadsmaterial.lth.se

FÖRORD

Denna rapport presenterar det arbete som utförts vid Avdelningen för Byggnadsmaterial, LTH, för att studera "Frostbeständigheten hos armerade betongbalkar förstärkta med kolfiberkomposit". Arbetet har finansierats av SBUF samt Skanska Teknik AB.

Arbetet har genomförts av Manouchehr Hassanzadeh, Bo Johansson, Ingemar Larsson och Bengt Nilsson. Resultaten har bearbetats av Manouchehr Hassanzadeh.

Lund maj 2002

Manouchehr Hassanzadeh

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

		Sida
1	BAKGRUND	1
2	UTFÖRANDE	3
2.1	Allmänt	3
2.2	Försöksuppställning	3
2.3	Provningsparametrar	4
3	TILLVERKNING OCH LAGRING AV PROVKROPPAR	7
3.1	Armering	7
3.2	Gjutning	8
3.3	Lagring och härdning	8
3.4	Förstärkning	8
4	TEMPERATURVARIATIONER VID FRYSNING OCH UPPTINING	11
5	VATTENMÄTTNADSGRAD EFTER FRYSNING OCH UPPTINING	13
6	MEKANISKA PROVNINGAR	15
6.1	Armeringens sträck- och brottgräns	15
6.2	Bestämning av balkarnas bärförmåga	15
6.3	Bestämning av betongens tryck- och spräckhållfasthet	16
6.4	Last - nedböjningskurvor	16
6.5	Observationer under provningar	19
7	BALKARNAS BROTTBETEENDE	25
7.1	Mekanisk materialmodell	25
7.2	Balkmodellen och beräkningsparametrar	26
7.3	Resultaten av beräkningarna	28
8	DISKUSSIONER	33
9	SLUTSATSER	35
10	REFERENSER	37

BILAGA 1 – 4

SUMMARY

The present report considers results of an experimental study dealing with the frost-resistance of strengthened concrete beams containing fibre-reinforced composite. The experiments involved the freezing and thawing of reinforced concrete beams strengthened by an epoxy - carbon fibre composite.

The beams contained longitudinal tension and compression reinforcement, and stirrups. The epoxy carbon fibre composite were glued at the bottom of the beam.

In order to introduce a temperature gradient along with the depth of the beams, they were placed on the top of a freezer box. During the freezing period the frost front moved from the bottom of the beams towards the top of the beams and during the thawing period the thawing front moved from the top of the beams towards the bottom of the beam. Three beams were tested simultaneously. The beams differed in moisture content. The first and the second beams were placed in water one week before freeze test. The third beam were conditioned in the laboratory climate. All beams were painted by a diffusion tight epoxy mortar to prevent drying of the beams. The first beam had access to water during the freeze and thaw cycles. The water was provided from the upper surface of the beam which was not painted.

Six series of freeze and thaw tests, similar to that described above, have been performed. In three of the series the beams were, during the freeze and thaw cycles, mechanically loaded up to 70% of their failure load. Two series of tests concerned beams without strengthening composite while the remaining four series concerned strengthened beams.

Besides the experiments some theoretical analyses have been conducted to illuminate the fracture behaviour of the beams.

The results do not indicate any deterioration of neither the strengthening composite nor adhesion between the composite and the concrete caused by the combined effects of moisture, frost and sustained loading. The results show, however, that the moisture in combination with freeze and thaw cycles have considerable effects on the load bearing and deflection capacity of the strengthened beams. The later is probably caused by the reduction of the tensile strength of concrete rather than deterioration of the strengthening composite.

The moisture, frost, temperature gradient, and loading during the freeze and thaw cycles had no influence on the load bearing capacity of the non-strengthened beams.

1 BAKGRUND

Denna rapport beskriver delar av de arbeten som på uppdrag av Skanskas tidigare, nu avvecklade, dotterbolag Stabilator AB har utförts vid Avdelningen för Byggnadsmaterial, LTH. Syftet med uppdraget har varit att undersöka vidhäftningshållfastheten när en kolfiberkomposit limmas mot en betongyta. Det övergripande målet var härvidlag att kunna bedöma samverkan mellan kolfiberkompositen och betongen. Avgörande för samverkan mellan dessa delar är betongytans beskaffenhet vid limningstillfället, samt förändringar hos betongens fukttillstånd och fuktfördelning i kombination med frost och belastning efter applicering av kompositmaterialet.

Uppdraget var indelat i två delstudier :

- Delstudie 1: Inverkan av underlagets beskaffenhet vid appliceringstillfället, d.v.s. "tiden noll", på vidhäftningen.
- Delstudie 2: Inverkan av last, fukt och frost på konstruktionens beständighet.

Denna rapport avser att beskriva de arbeten som har utförts inom delstudie 2. Delstudie 1 har slutförts och större delen av arbetet har avrapporterats, se "Beständighet hos kompositmaterial för infrastrukturkonstruktioner" Uppdragsrapport U00.07, Avdelningen för Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola. Resterande delen av delstudie 1 beskrivs i en rapport som är under bearbetning.

2 UTFÖRANDE

2.1 Allmänt

Vid denna delstudie studerades inverkan av nedanstående faktorer på vidhäftningen mellan betongen och kolfiberkompositen:

- Inverkan av frost i kombination med fukt på bärförmågan hos armerad balk förstärkt med kolfiberkomposit.
- Inverkan av frost i kombination med fukt på bärförmågan hos belastad armerad balk förstärkt med kolfiberkomposit.

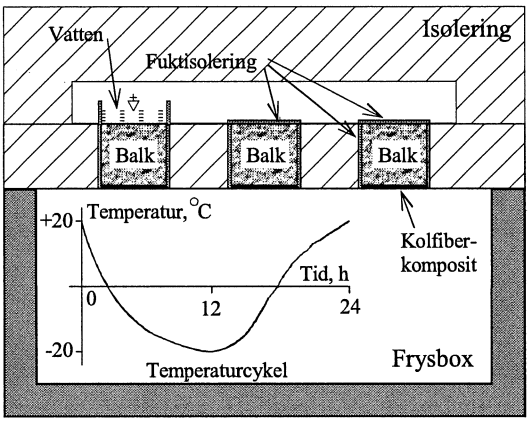
Samtliga provningar i denna delstudie utfördes på en typ av betong.

Betong med *vct* = 0.70

Som bindemedel användes i början Slite Standard och därefter ersattes det med byggcement. Ingen luftporbildare användes. Betongens sammansättning och diverse egenskaper framgår av Bilaga 1.

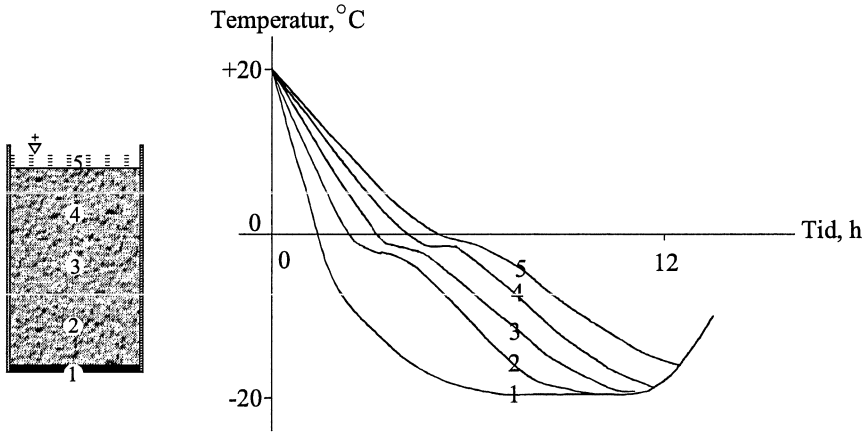
2.2 Försöksuppställning

Frostbelastningen utfördes genom att placera betongbalkar på en frysbox. Balkarnas längd, höjd och bredd var 1.1 m, 0.15 m och 0.1 m. I figur 1 visas schematiskt försöksuppställningen. Tre balkar placerades i frysboxen samtidigt. Skillnaden mellan balkarna var deras initiella fuktinnehåll. Samtliga balkar vattenhärdades 5 dygn efter avformningen. Därefter placerades de i laboratorium. Den vänstra respektive den mittersta balken vattenlagrades igen en vecka före frysningen.



Figur 1 Frysprovning av balkar.

Frysboxen och isoleringen reglerades så att balken utsattes för fryscykler och följaktligen temperaturgradient. I figur 2 visas schematiskt temperaturen på olika nivåer av balken som funktion av tiden.



Figur 2 Schematisk beskrivning av temperaturvariationer i en balk.

I vissa serier var balkarna belastade mekaniskt samtidigt som de utsattes för frysning och upptining. Belastningsutrustningen framgår av figur 3. Utrustningen fungerar i princip som en nötknäckare. Betongbalken placerades på två upplag. På ovansidan av betongbalken placerades en stålbalk. Mellan betongbalken och stålbalken, i mitten av balkarna, placerades ett upplag vilket kan betraktas som nöten. Den önskade belastningen, *P*, på betongbalken åstadkoms genom att påföra en tryckbelastning, *P/2*, på tallrikfjädrarna. Genom att låsa fjädrarnas läge i förhållande till mothållet kunde betongbalken hållas belastad.

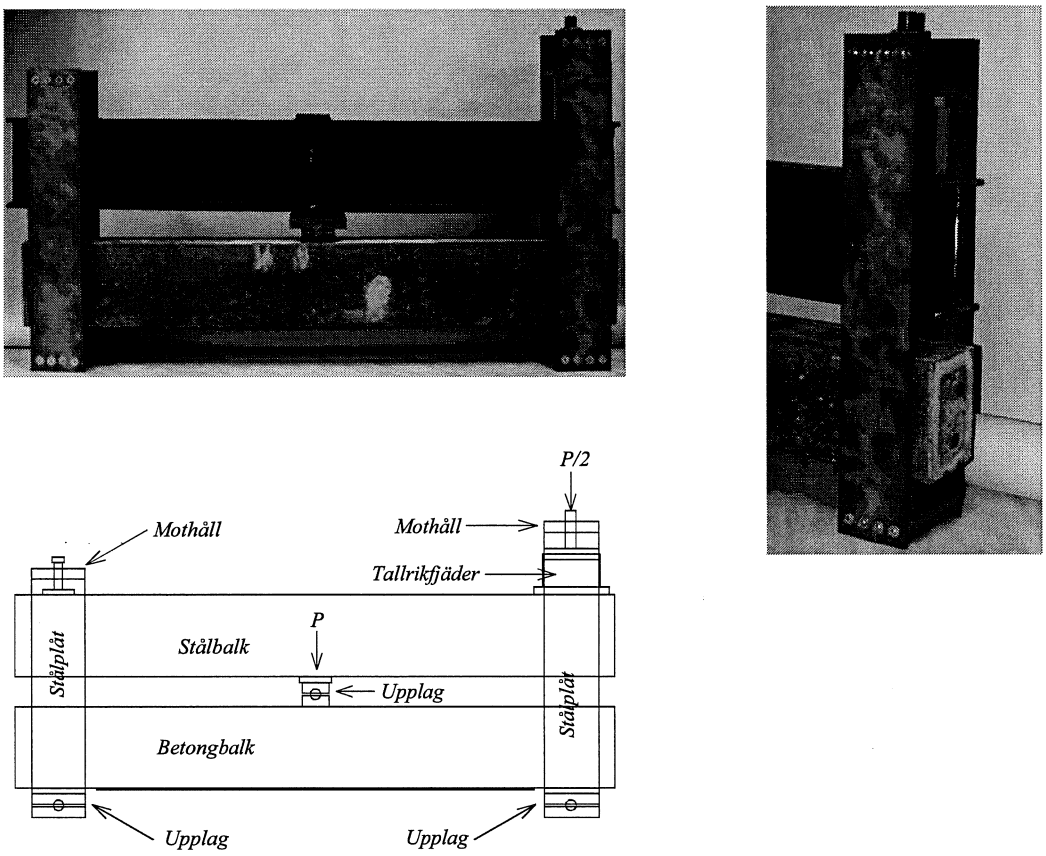
Fjädrar med relativt låg styvhet valdes för att dämpa effekten av betongens krypning samt temperaturväxlingar. En komplett data om belastningsutrustningen finns i bilaga 2. De belastade balkarna placerades på frysboxen på samma sätt som de obelastade balkarna.

2.3 Provningsparametrar

Fuktnivå
Som framgår av figur 1 placerades tre balkar samtidigt på en frysbox. Balkarna hade olika fukttillstånd.

1) Balk 1 placerades i vatten en vecka före frysning och hade tillgång till vatten från ovansidan under frysning och upptining.
2) Balk 2 placerades i vatten en vecka före frysning men hade inte tillgång till vatten under frysning och upptining.
3) Balk 3 konditionerades i laboratorium.

Samtliga balkar beströks med ett epoxibruk. Brukets ånggenomgångsmotstånd mättes till $0.12 \cdot 10^6$ s/m. Det vill säga, varje balk förlorade 3.6 g vatten/dygn förutsatt omgivningens temperatur respektive relativa fuktighet var 20 °C respektive 50%. Förlusten motsvarar ca 0.15% av den öppna porvolymen.



Figur 3 Utrustning för belastning av en balk under frysning och upptining.

Fryscykler
Balkarna utsattes för i genomsnitt 28 fryscykler. Det var svårt att uppnå en fryscykel/dygn. Dessutom tog det lång tid att uppnå +20 °C grader, så fryscyklerna avbröts innan balken kunde uppnå höga temperaturer. De verkliga temperaturerna redovisas längre fram i rapporten.

Förstärkning
Både förstärkta och icke förstärkta balkar provades. Varje serie bestod av 6 balkar som göts samtidigt med samma betongblandning. Tre av balkarna förstärktes medan de resterande balkarna var utan förstärkning.

Betongkvalitet
Det var planerat att utföra provningar med två olika betongkvaliteter, den ena med *vct* = 0.50 och den andra med *vct* = 0.70. Det visade sig att tillverkning, preparering och provning av balkarna var mycket tidskrävande. Därför ströks betongen med *vct* = 0.50. Enbart två balkar med *vct* = 0.50 har provats. Anledningarna att betongen med *vct* = 0.70 valdes var att denna betong är mindre tät samt har sämre frostbeständighet, vilka kunde leda till bättre utslag av effekterna.

Lastnivå
Vissa balkar var belastade under frysprovningarna. Provningsserierna kan med hänsyn till belastningsnivå indelas i två grupper enlig nedan:

1) Lastnivå 1: 0% av brottlasten.
2) Lastnivå 3: 70% av brottlasten.

Med brottlast avses balkens, referensbalkens, bärförmåga vid 28 dygns ålder. Den icke förstärkta referensbalkens brottlast vid 28 dygns ålder var 47 kN. Därför belastades de icke förstärkta balkarna med 33 kN. Den förstärkta referensbalkens brottlast vid 28 dygns ålder var 66 kN. Därför belastades de förstärkta balkarna med 46 kN.

Med anledning av att fiberkompositen används som förstärkning, d.v.s. man höjer konstruktionens brottlast för att utnyttja den vid högre lastnivåer, kommer den under frysprovningen pålagda lasten att vara större hos den förstärkta balken än den icke förstärkta balken. Däremot är den relativa lastnivån konstant.

Antal provningar per variabel
En balk per variabel provades. Antal balkar som provades framgår av Tabell 1.

Tabell 1 Sammanställning av balkar för provning.

Referens I	Utan belastning	Utan förstärkning	Antal 3	Blandning 1
Referens II	Utan belastning	Med förstärkning	Antal 3	
FB21	Utan belastning	Utan förstärkning	Antal 3	Blandning 2
FB22	Utan belastning	Med förstärkning	Antal 3	
FB25	Med belastning	Utan förstärkning	Antal 3	Blandning 3
FB26	Med belastning	Med förstärkning	Antal 3	
FB22Ex	Utan belastning	Med förstärkning	Antal 3	Blandning 4
FB26Ex	Med belastning	Med förstärkning	Antal 3	

Utöver ovanstående balkar tillverkades två balkar med $vct = 0.50$ och deras brottlast bestämdes.

3 TILLVERKNING OCH LAGRING AV PROVKROPPAR

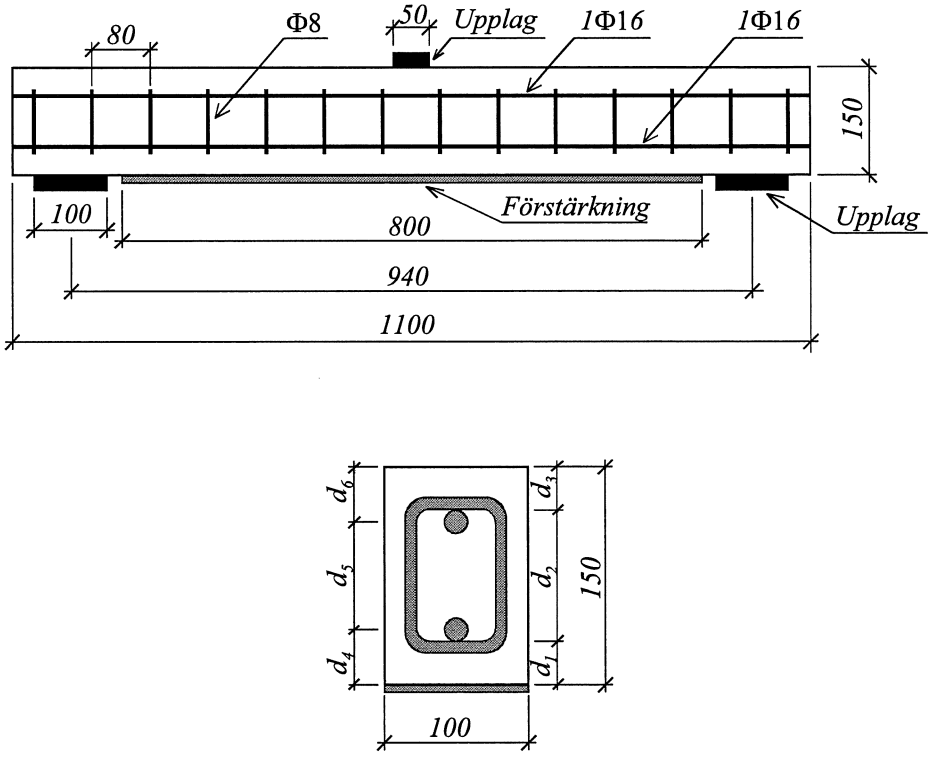
3.1 Armering

Balkarnas utformning framgår av figur 4. Balkarna var armerade med en Φ16 B500BT på undersidan och en på ovansidan. Balkarna armerades dessutom med 14 byglar Φ8 B500BT. Av figuren framgår även förstärkningens placering samt upplagens placering vid provning.

I figur 4 visas även balkens tvärsnitt. Parametrarna d_1-d_3 mättes för varje individuell balk. Medelvärden respektive standardavvikelserna framgår av tabell 2. Tabellen visar även parametrarna d_4-d_6 som är beräknade med hjälp av parametrarna d_1-d_3. De enskilda mätningarna framgår av bilaga 1.

Tabell 2 Mätningar av täckskikten.

	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6
Medelvärdet [mm]	31.3	87.6	31.8	39.3	71.6	39.8
Standardavvikelse [mm]	1.2	1.9	1.3	-	-	-



Figur 4 Balkar som användes vid studien.

3.2 Gjutning

Balkarna göts i plywoodsformar. Det betongrecept som användes framgår av tabell 3.

Tabell 3 Betongrecept vct = 0.70.

	Kg/m^3
Cement	274
Vatten	192
Grus 0-8	1027
Makadam 8-12	403
Makadam 12-16	403

Ytterligare två balkar tillverkades med betong *vct* = 0.50. Betongreceptet framgår av tabell 4.

Tabell 4 Betongrecept vct = 0.50.

	Kg/m^3
Cement	411
Vatten	205.5
Grus 0-8	902
Makadam 8-12	391
Makadam 12-16	409

De flesta gjutningar utfördes med 140 liter blandningssatser. Blandningssatsens mängd, sättmått, lufthalt samt densitet framgår av bilaga 1.

Vid varje gjutningstillfälle göts 6 balkar. Tre balkar förstärktes medan de resterande tre balkarna inte förstärktes.

Vid varje gjutningstillfälle göts även 3 kuber med kantstorleken 150 mm samt 3 cylindrar med diametern 100 mm och längden 200 mm. Kuberna användes för att bestämma betongens tryckhållfasthet. Cylindrarna användes för att bestämma betongens spräckhållfasthet.

Det cement som användes var i början Standard Portlandcement, tidigare Slite Standard. Efter ett tag avbröts tillverkningen av Slite Standard. Cementet ersattes då med Byggcement. Vilken effekt detta cement har på undersökningen går inte att verifiera.

3.3 Lagring och härdning

Balkarna och de övriga provkropparna avformades dagen efter gjutning och härdades i vatten under 5 dygn. Därefter härdades de i laboratorieklimat. Lagring före frysningen utfördes enligt avsnitt 2.3.

3.4 Förstärkning

De balkar som förstärktes, tidigast tre veckor efter gjutning, blästrades på undersidan, d.v.s. den sida som utgjorde formbotten. Därefter primades balkarna och härdades i laboratoriet under ett dygn.

Kolfiberkompositen applicerades i följande ordning:

- ett lager lim applicerades med hjälp av roller,
- ett lager kolfiberväv placerades och bearbetades med roller,
- föregående två stegen upprepades ytterligare en gång.

Kolfibern levererades i rullar. Fibrerna var i form av väv, matta, inom vilken fibrerna var orienterade i rullens riktning. Rullens bredd var 300 mm.

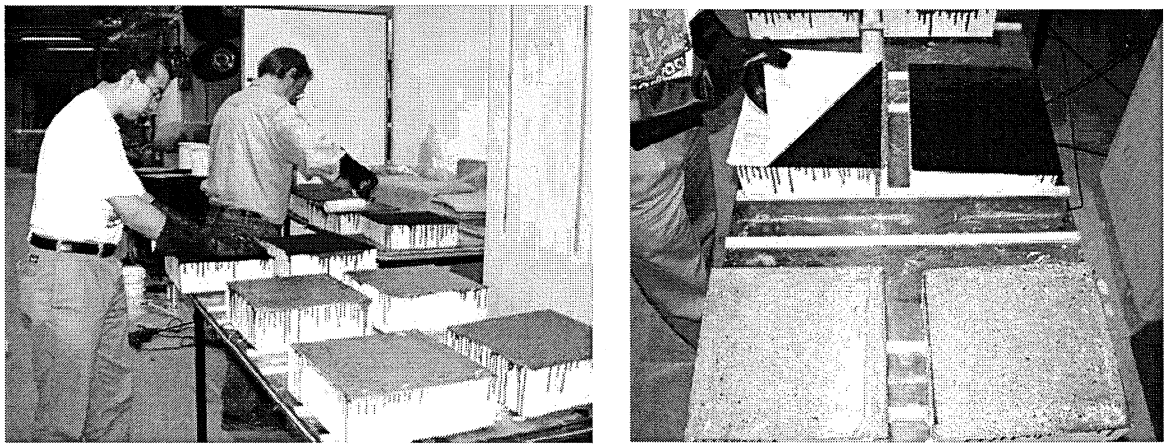
Kolfiberväven, BPE Composite 200S, levereras med olika tjocklekar. Den väv som användes vid denna undersökning var 0.11 mm tjock.

Primer bestod av BP50 Super med BPE Härdare 50, leverantor BPE Systems AB.

Limmet bestod av BPE Lim 417 och BPE Härdare 417B, leverantör BPE System AB.

I Figur 5 visas appliceringen av kolfiberkompositen på betongplattor. Applicering på balkar har utförts i princip på samma sätt.

Efter applicering av kolfiberväv förvarades balkarna i laboratoriet.



Figur 5 *Applicering av kolfiberkomposit på betongplattor.*

4 TEMPERATURVARIATIONER VID FRYSNING OCH UPPTINING

Balkarna placerades på ovansidan av en frysbox. Genom att manuellt starta och stänga av frysboxen samt genom att sätta på och lyfta av isoleringen, se figur 1, reglerades frysning och upptining av balkarna. Det var svårt att åstadkomma en fryscykel per dygn samt, på grund av att systemet var manuellt var det svårt att fortsätta med frysning och upptining under helgerna.

På ovansidan av den balk som hade tillgång till vatten placerades även en värmekabel för att förkorta tiden för issmältningen.

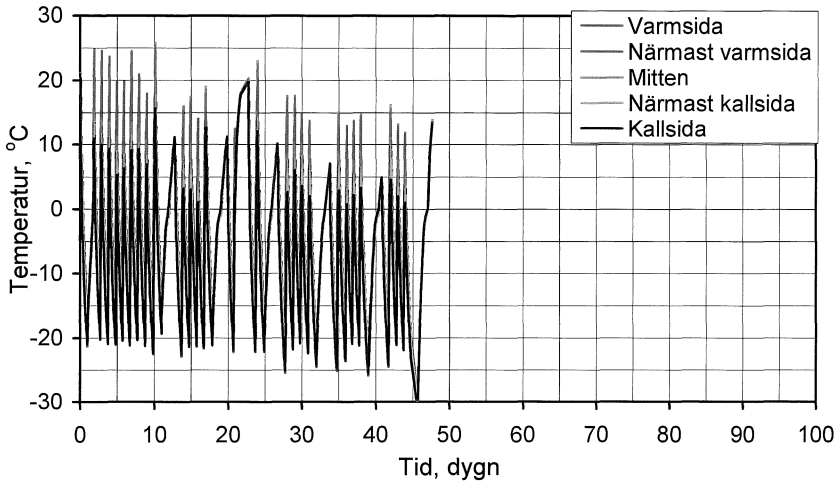
Temperaturen mättes på tre nivåer i balken:

1: 30 mm från den varma sidan, i figurerna refereras som "Närmast varmsida".
2: 75 mm från den varma sidan, i figurerna refereras som "Mitten".
3: 120 mm från den varma sidan, i figurerna refereras som "Närmast kallsida".

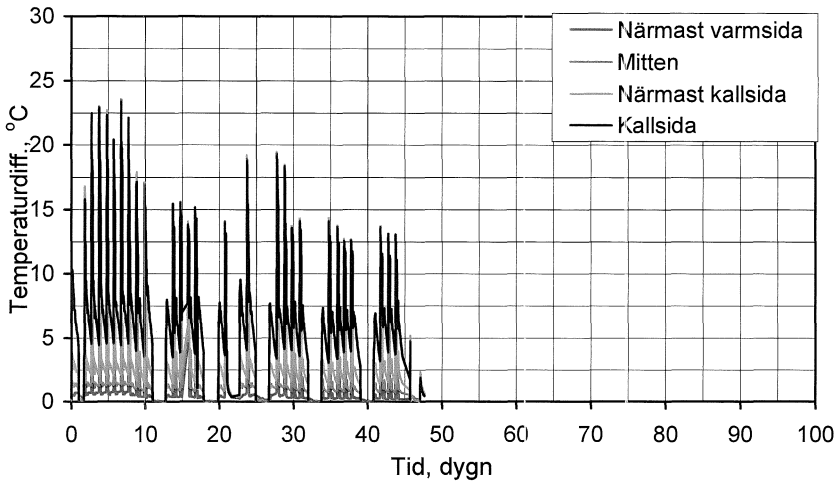
Temperaturen mättes även på balkens ovansida, ytan på den varma sidan, samt på balkens undersida, ytan på den kalla sidan. Denna mätning utfördes på en balk, d.v.s. balken som var placerad i mitten, se figur 1. Denna balk är densamma som balk nummer 2 enligt avsnitt 2.3, d.v.s. den balk som placerades en vecka i vatten och inte hade tillgång till vatten under frysning. Resultaten av samtliga temperaturmätningar redovisas i bilaga 3.

I figur 6 visas mätningar från en balk. Balken var obelastad och förstärkt. Balken var vattenlagrad en vecka före frysning men hade inte tillgång till vatten under frysning. Resultaten redovisas med hjälp av fyra figurer. Figur *6a* visar temperaturen som funktion av tiden i fem olika punkter i balken. Figur *6b* visar differensen mellan temperaturen på balkens ovansida, varmsida, och temperaturerna på de resterande 4 punkterna i balken. Figur *6c* visar temperaturvariationen genom balken vid olika tillfällen under frysning. Figur *6d* visar temperaturvariationen genom balken vid olika tillfällen under upptinig.

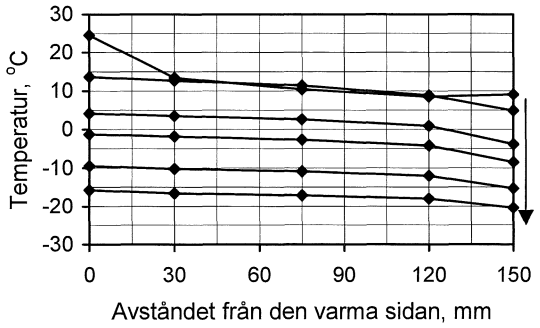
Som framgår av figur *6c* och *6d* är temperaturgradienten inte så stor inom balken. Skillnaden mellan temperaturen vid övre armering och undre armering är ca 5 °C. Skillnaden mellan balkens ovankant och underkant kan dock bli stor. Vid vissa tillfällen är den större än 20 °C, se figur *6b*.



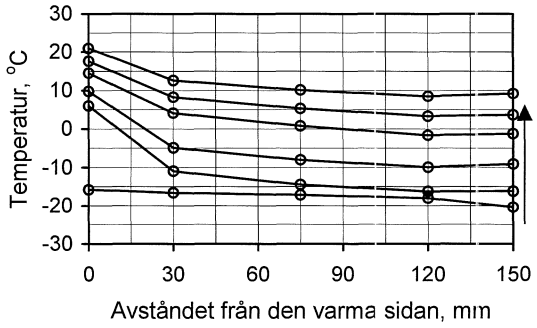
(*a*)



(*b*)



(*c*)



(*d*)

Figur 6 Temperaturvariation i en balk under frysning och upptining.

5 VATTENMÄTTNADSGRAD EFTER FRYSNING OCH UPPTINING

Efter avslutad frysning och upptining bestämdes balkarnas bärförmåga. Därefter bestämdes balkarnas vattenmättnadsgrad. Vattenmättnadsgraden bestämdes hos samtliga balkar som var vattenlagrade före frysning och upptining. Vattenmättnadsgraden bestämdes genom att ta ut två borrkärnor, A och B, från balkens vardera ände. Borrkärnans diameter var 25 mm och dess riktning var från balkens ovankant mot dess underkant. Borrkärnan delades i tre lika delar 1, 2 och 3. Del 1 var närmast balkens ovankant medan del 3 var närmast balkens underkant. Vattenmättnadsgraden bestämdes med hjälp av följande formel:

$$V = \frac{M_f - M_e}{M_v - M_e} \cdot 100 \qquad (1)$$

V = vattenmättnadsgrad (%)
M_f = vikt efter borrning (kg)
M_e = vikt efter uttorkning vid 105 °C (kg)
M_v = vikt efter vakuumbehandling och vattenlagring (kg)

$(M_f - M_e)$ = aktuellt vattenmängd i provkroppen (kg)
$(M_v - M_e)$ = maximum vattenmängd som kan tas upp av öppna porer (kg)

Samma provbitar användes även för bestämning av betongens porositet.

Samtliga resultat redovisas i bilaga 4.

6 MEKANISKA PROVNINGAR

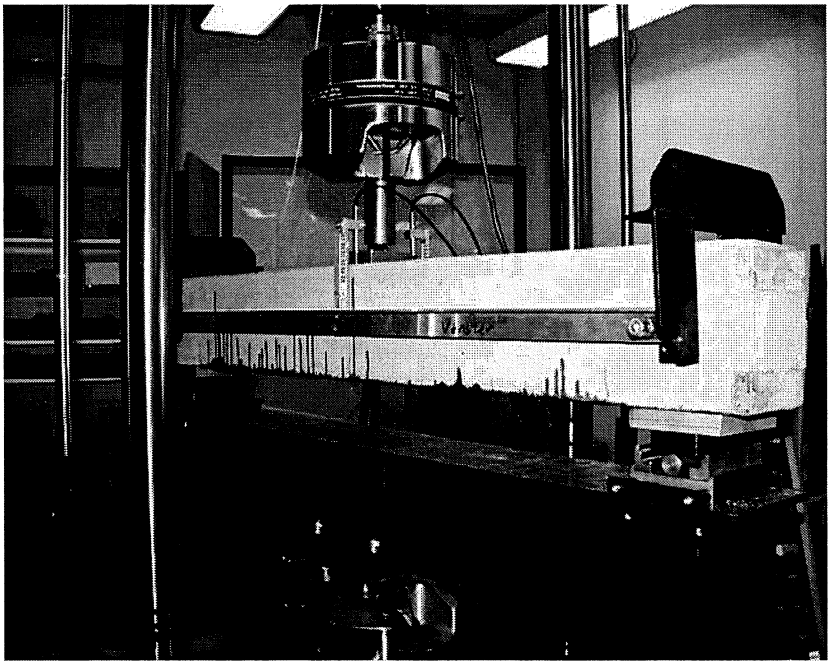
6.1 Armeringens sträck- och brottgräns

Armeringens sträckgräns och brotthållfasthet bestämdes med hjälp av fyra provkroppar. Nedan visas medelvärdet och standardavvikelsen av provningsresultaten:

Sträckgräns =	550 MPa	Standardavvikelse =	30 MPa
Brottgräns =	660 MPa	Standardavvikelse =	33 MPa

6.2 Bestämning av balkarnas bärförmåga

Balkarnas bärförmåga bestämdes genom trepunktsbelastning, se figur 4. Provningarna utfördes med deformationskontrollerad belastning. Nedböjningarna bestämdes med hjälp av två stycken lägesgivare som var monterade på en linjal på vardera sidan av balken. Nedböjningen avser differensen mellan rörelsen hos balkens ovankant i balkmitt och balkens upplag. I figur 7 visas 2 lägesgivare som är placerade i mitten av balken på ömse sidor om lastupplaget. Av figuren framgår också den linjal på vilken givarna är monterade. De nedböjningar som redovisas i denna rapport är medelvärdet av de två lägesgivarna.



Figur 7 Placering av lägesgivare.

6.3 Bestämning av betongens tryck- och spräckhållfasthet

Betongens tryckhållfasthet och spräckhållfasthet bestämdes. Som framgick tidigare göts även tre cylindrar, 100 mm x 200 mm, och tre kuber, 150 mm, vid varje gjutningstillfälle. Provkropparna användes för att bestämma betongens spräck- och tryckhållfasthet. Resultaten redovisas nedan tillsammans med last - nedböjningskurvor.

6.4 Last - nedböjningskurvor

Last - nedböjningskurvorna framgår av figur 8-10.

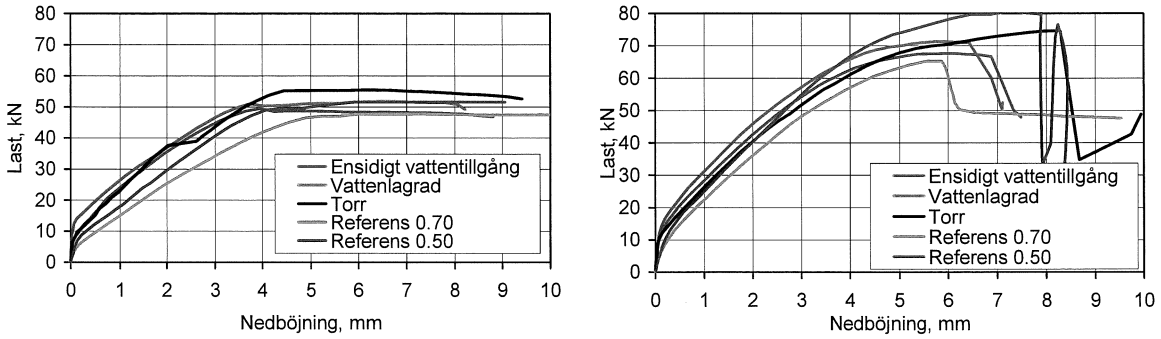
Referensbalkar
I figur 8 visas resultaten för referensbalkar tillverkade med betong, *vct* = 0.70 och *vct* = 0.50. De icke förstärkta, *a*, och de förstärkta, *b*, balkarna har tillverkats med betong från samma blandning. Resultaten av referensbalkarna med betong, *vct* = 0.70, visas även i figur 9 och 10. Referensbalkarnas tryck- respektive spräckhållfastheterna framgår av tabell 5.

Förstärkta och icke förstärkta balkar ej belastade under frysning och upptining
Resultaten av dessa balkar visas i figur 8. Samtliga balkar har tillverkats med samma betongblandning, *vct* = 0.70. I figuren "Ensidigt vattentillgång", "Vattenlagrad" samt "Torr" refererar till fukttillstånden 1, 2 och 3 enligt avsnitt 2.3. Betongblandningens tryck- respektive spräckhållfasthet framgår av tabell 5.

Förstärkta och icke förstärkta balkar belastade under frysning och upptining
Resultaten av dessa balkar visas i figur 9. I övrigt gäller samma beskrivningar som ovan.

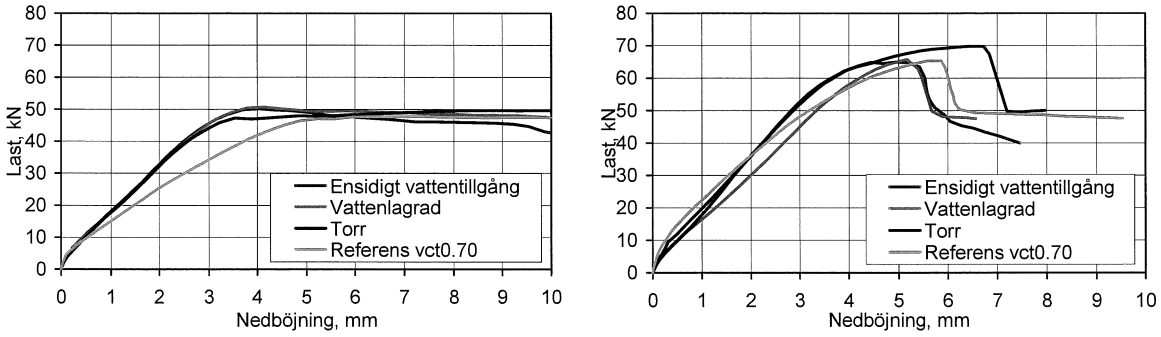
Förstärkta, ej belastade och belastade under frysning och upptining, balkar Extra serie
Resultaten av dessa balkar visas i figur 10. I övrigt gäller samma beskrivningar som ovan.

Dessa balkar har fått en annorlunda frysnings- och upptiningsförlopp, se temperaturkurvorna i bilaga 3. Balkarna utsattes för en temperaturskillnad, mellan balkens ovankant och underkant, på, i medeltal, 15 °C under 40 dygn. Därefter utsattes de för frysning och upptining. Emellanåt har balkarna, under korta perioder, blivit utsatta för konstanta temperaturgradienter samt låga temperaturer som -28 °C.



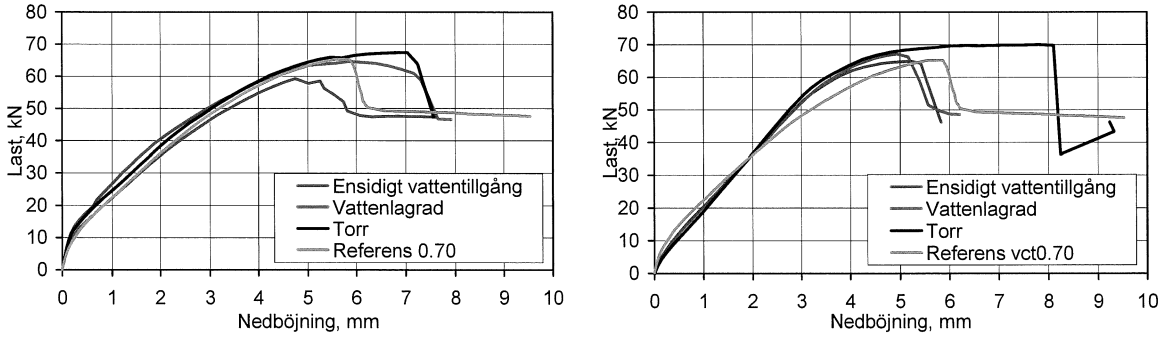
(*a*) (*b*)

Figur 8 *Last-nedböjningskurvor för icke förstärkta (a) och förstärkta (b) balkar, balkarna var inte belastade under frysning och upptining.*



(*a*) (*b*)

Figur 9 *Last-nedböjningskurvor för icke förstärkta (a) och förstärkta (b) balkar, balkarna var belastade under frysning och upptining.*



(*a*) (*b*)

Figur 10 *Last-nedböjningskurvor för, under frysning och upptining, ej belastade (a) och belastade (b) balkar. Balkarna var förstärkta, extra serie.*

Tabell 5 Sammanställning av betongblandningarnas tryck- och spräckhållfasthet.

	Tryckhållf. MPa	Std. Av. MPa	Spräckhållf. MPa	Std. Av. MPa
1- Referensbalkar *vct* = 0.70 *	32	1.7	2.7	0.2
2- Förstärkta och icke förstärkta balkar ej belastade, *vct* = 0.70 *	55	1.6	5.1	0.2
3- Förstärkta och icke förstärkta balkar belastade, *vct* = 0.70	41	1.3	3.7	0.2
4- Förstärkta, ej belastade och belastade balkar, Extra serie, *vct* = 0.70	37	0.3	3.5	0.2
5- Referensbalkar *vct* = 0.50 *	57	1.4	3.9	0.1

Som framgår av tabell 5 uppvisar gjutningarna inte en jämn kvalitet. De blandningar som är markerade med * tillverkades med det gamla Slite Standard cementet medan de övriga tillverkades med det nya Byggcementet. Betong med *vct* = 0.70 och den gamla Slite Standardcementet uppvisade en tryckhållfasthet av storleksordningen 35 MPa. Det nya cementet uppvisar ungefär samma hållfasthet kanske något högre, som till viss grad förklarar skillnaden mellan blandning 1, 3 och 4. Vidare kan en del av skillnaden förklaras med skillnaden i blandningarnas konsistens. Blandning 2 hade betydligt lösare konsistens än de övriga, se bilaga 1, vilket kan ha medfört vattenseparation i betongen.

Skillnaden mellan blandning 2 och de övriga blandningar med *vct* = 0.70 är stor och kan inte förklaras med annat än att det har uppstått ett fel vid vattendoseringen. Det bör noteras att konsistensen för denna blandning var betydligt styvare än de övriga. Den hårdnade betongens porositet är lägre hos blandning 2 än blandning 3 och 4 vilket förstärker det ovanstående påståendet.

Tabell 6 Sammanställning av betongblandningarnas tryck- och spräckhållfasthet.

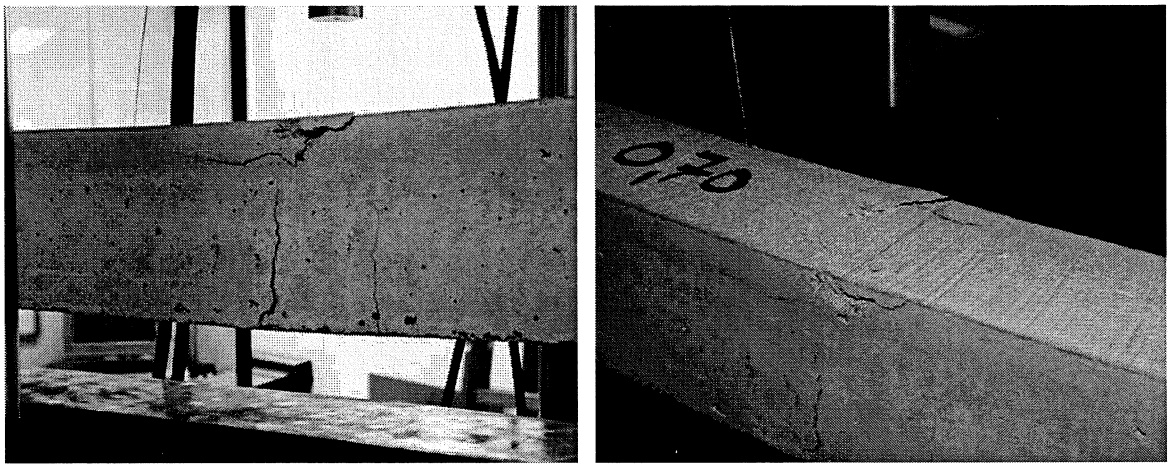
	Porositet 1 %	Std. Av. %	Porositet 2 %	Std. Av. %
2- Icke förstärkta balkar ej belastade, *vct* = 0.70	14.2	0.8	13.9	0.8
2- Förstärkta balkar ej belastade, *vct* = 0.70	14.6	0.7	14.6	1.3
3- Förstärkta balkar belastade, *vct* = 0.70	15.1	0.8	16.1	1.2
3- Icke förstärkta balkar belastade, *vct* = 0.70	16.2	1.6	15.5	1.8
4- Förstärkta, ej belastade balkar, Extra serie, *vct* = 0.70	15.1	1.2	15.3	1.4
4- Förstärkta, belastade balkar, Extra serie, *vct* = 0.70	15.1	0.6	15.0	0.8

I tabellen hänvisar "Porositet 1" till porositet hos den balk som hade tillgång till vatten under frysning och upptining. "Porositet 2" hänvisar till porositet hos den balk som var vattenlagrad före frysning och upptining men inte hade tillgång till vatten under provningen.

De ojämna betongkvalitéerna begränsar naturligtvis till viss utsträckning möjligheterna att dra långtgående slutsatser. Det är ändå möjligt att kunna komma fram till värdefulla slutsatser genom att använda de erhållna resultaten inom samma blandning.

6.5 Observationer under provningar

Brottet hos de icke förstärkta balkarna var uteslutande böjbrott på det sätt som framgår av figur 11. Vid denna typ av brott flyter armeringen i underkant samt bildas så småningom en brottzon i den övre delen av balken, d.v.s. i den tryckta delen.



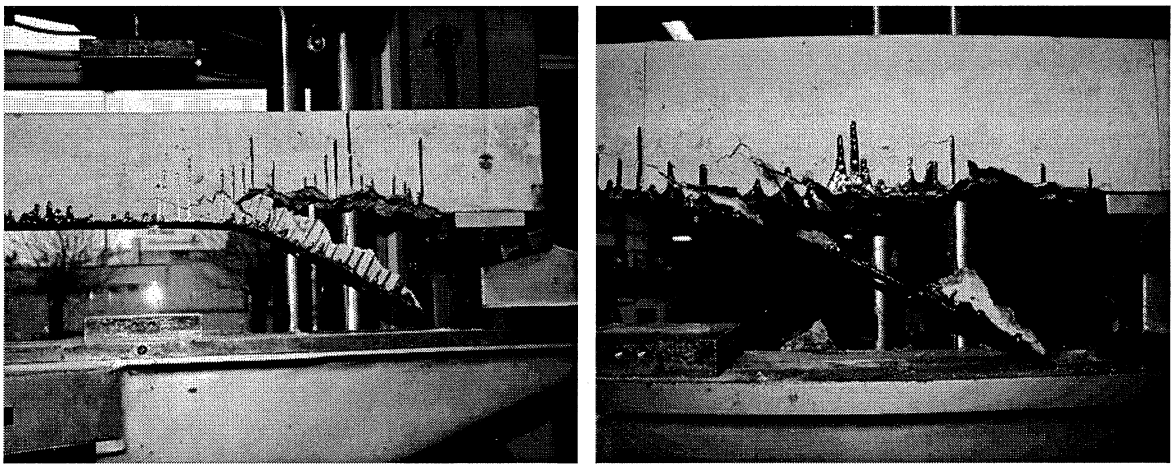
(a) (b)

Figur 11 Brott hos icke förstärkt balk, referensbalk.

Brottet hos de förstärkta balkarna bestod av två typer. Den första typen, d.v.s. dominerande typen, framgår av figur 12*a*. Den här typen av brott karakteriseras av ett dragbrott i den nedre delen av balken nära upplaget. Förstärkningen drar med sig en bit av betongen.

Den andra typen framgår av figur 12*b*. Brottet orsakas av ett "vidhäftningsbrott" mellan betongen och förstärkningen. Ett väldefinierat vidhäftningsbrott kännetecknas av att limmet släpper från betongens yta. Ett sådant brott har inte observerats vid de provningar som redovisas här. Det brott som här benämns vidhäftningsbrott är en kombination av betongbrott, limbrott och vidhäftningsbrott. På grund av att brottet har skett inom ett tunt skikt benämns brottet som vidhäftningsbrott för att skilja den här typen från den typ av brott som enbart går genom betongen.

Som framgår av figuren bildas, vid vidhäftningsbrott, även en brottzon, sprickzon, i nivå med den nedre armeringen. Brottzonen löper parallellt med balkens längdaxel. I detta fall var betongens draghållfasthet samt vidhäftningshållfastheten mellan betongen och armeringen, både den längsgående och byglarna, tillräcklig stor för att hålla betongen kvar. I de flesta fall är detta inte fallet. Speciellt när betongen utsätts för frysning i kombination med fukt.



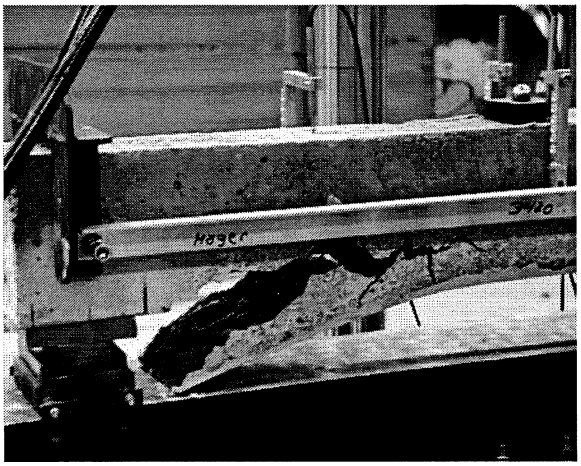
(a) *(b)*

Figur 12 Brott hos förstärkt balk.

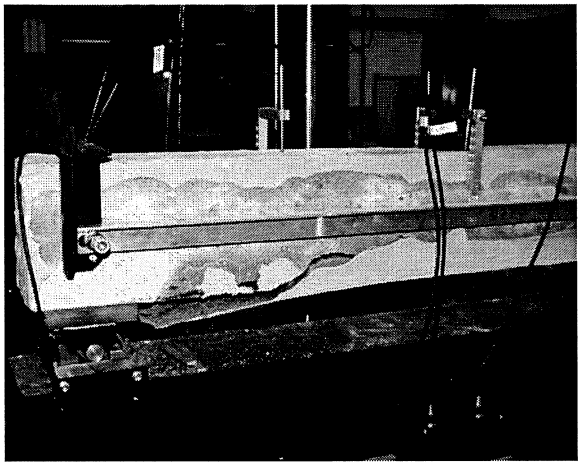
De balkar som utsattes för frysning och upptining uppvisade samma typ av brott. De icke förstärkta balkarna uppvisade uteslutande böjbrott.

De förstärkta balkarna uppvisade samma typ av brott som referensbalkarna. I figur 13 visas de balkar som före frysning och upptining utsattes för temperaturgradient under lång tid. Balkarna var inte belastade under frysning och upptining. De ovan beskrivna brottformerna kan observeras i figur 13.

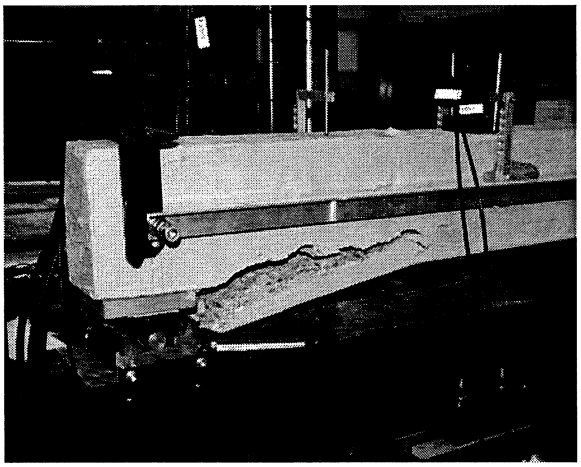
I figur 13*a* kan även observeras en del som har släppt från armeringen. Den visas med en vit rektangel. I figur 13b syns att betongen har brustit nära förstärkningen. Även i detta fall kan observeras sprickor på samma nivå som den längsgående armeringen.



(a)



(b)

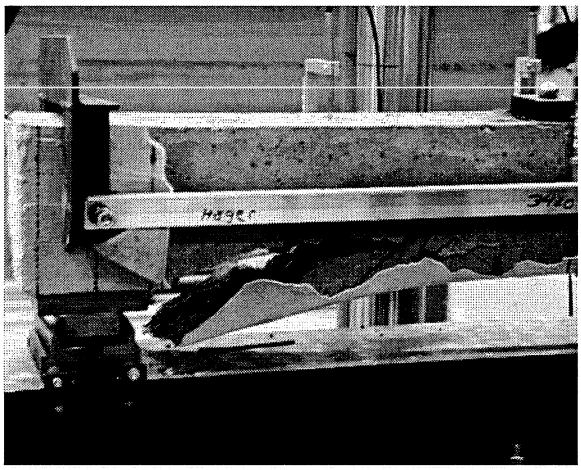


(c)

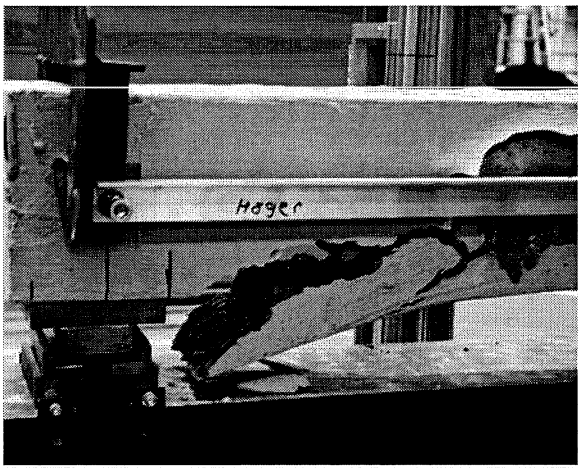
Figur 13 Brott hos förstärkta balkar som var utsatta för frysning och upptining. Balkarna var inte belastade under frysprovningen.

(a) Ensidigt tillgång till vatten
(b) Vattenlagrad
(c) Torr

I figur 14 visas brottet hos förstärkta balkar som var belastade under frysning och upptining. Som framgår av figuren finns även här någon balk som har brustit p.g.a. vidhäftningsbrott. I motsats till fallet i figur 13 är det den torra balken som uppvisar vidhäftningsbrott.



(a)



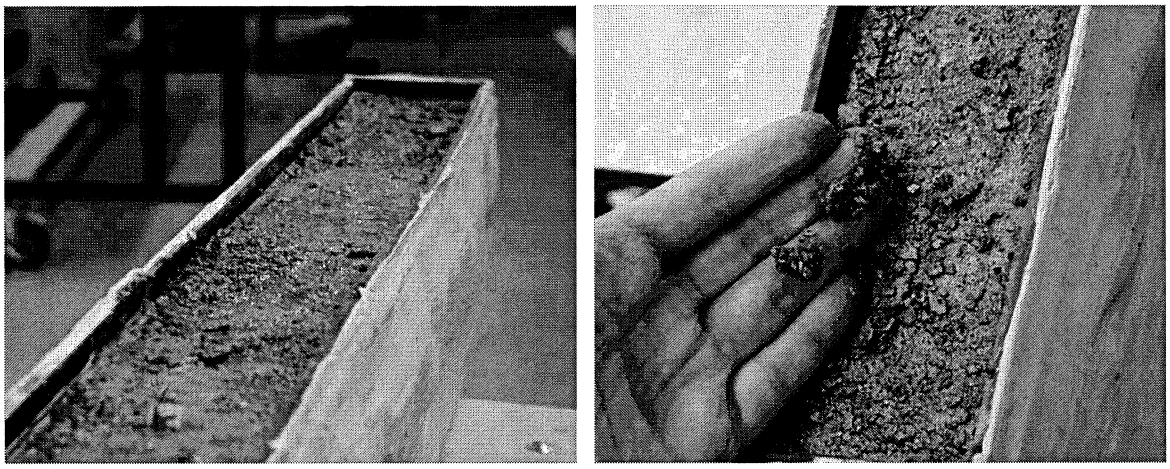
(b)

(c)

Figur 14 Brott hos förstärkta balkar som var utsatta för frysning och upptining. Balkarna var belastade under frysprovningen.

(a) Ensidigt tillgång till vatten
(b) Vattenlagrad
(c) Torr

De balkar som, under frysning och upptining, hade tillgång till vatten fick synbara skador på ytan, figur 15. Det kunde inte avgöras om skadorna var djupgående eller enbart fanns på ytan. Normalt uppkommer ingen avflagning när betong fryses i färskvatten. De skador som uppstår beror på att ofruset vatten fanns på betongens yta medan betongen hade temperaturer långt under 0 °C. Detta fall liknar de fall där grova nedfrusna betongkonstruktioner utsätts för fritt vatten i form av regn eller töväder.

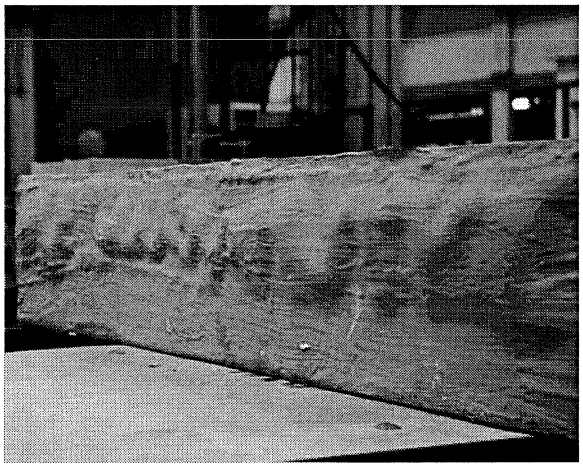


Figur 15 Avflagning på grund av frostskador.

Som beskrevs tidigare beströks balkarna med ett skikt epoxibruk för att förhindra fuktutbyte mellan balkarna och omgivningen. I samtliga fall fungerade skikten utan synbara defekter förutom i de fall där provningarna inleddes genom att utsätta balkarna för temperaturgradient. Vid dessa provningar släppte bruket från betongen och bildade bubblor, figur 16.

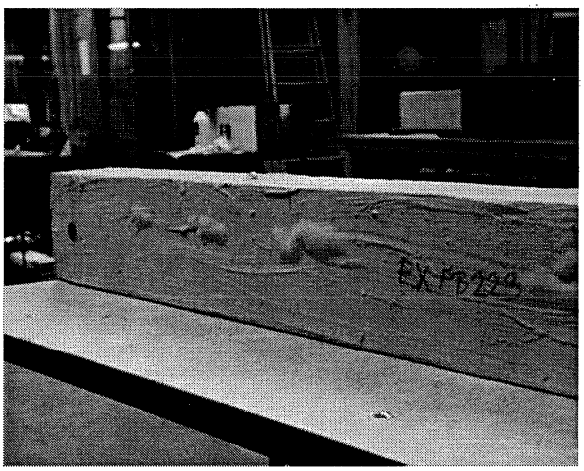
Det konstaterades att vatten kondenserade på balkarnas sidor och frös vilket indikerar att temperaturen på balkarnas sidor var låg. På grund av att brukets kontraktionskoefficient är betydligt större än betongens utsattes bruket för dragspänningar under frysning. Drag-spänningarna kan ha medfört att bruket dels har fått plastiska deformationer och dels har släppt från betongen. Vid upptiningstillfället har bruket tenderat att förlängas mer än betongen vilket har lett till att tryckspänningar uppstått i bruket. Tryckspänningen har medfört att bubblor har utvecklats.

Betongens fuktighet vid bestrykningstillfället avgör vidhäftningen mellan bruket och betongen. Ju fuktigare betongen är desto svagare är vidhäftningen, därför har de vattenlagrade balkarna mera och större bubblor. Dessutom kan vatten, i den balk som har tillgång till vatten, tränga in mellan bruket och betongen och underlätta uppkomsten av bubblor.



(a)

(b)



(c)

Figur 16 Bubblor hos epoxibruket. Förstärkta balkar som var utsatta för inledande temperaturgradient före frysning och upptining.

(a) Ensidigt tillgång till vatten
(b) Vattenlagrad
(c) Torr

7 BALKARNAS BROTTBETEENDET

7.1 Mekanisk materialmodell

Balkarnas brottbeteende har simulerats med hjälp av "Finita Element Metoden, FEM". FEM programmet DIANA, ett kommersiellt FEM program, har använts vid beräkningar.

Den modell som användes vid de beräkningarna tar inte hänsyn till samtliga för brottet avgörande faktorer. Det var inte programmet som begränsade beräkningarna utan bristen på materialdata, se nedan, samt projektets ekonomiska ramar. Syftet med simuleringen var att förstå balkarnas brottbeteende vilket till viss mån belyses av den förenklade modellen.

För en relativt noggrann analys bör modellen ta hänsyn till följande faktorer:

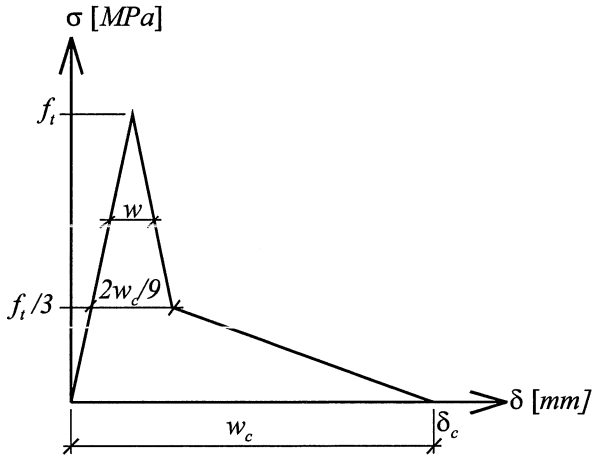
1) Betongens fullständiga arbetskurva vid drag- och tryckbrott.
2) Armeringsstålets dragarbetskurva upp till maximum last.
3) Förstärkningens arbetskurva.
4) Mekaniska egenskaperna hos vidhäftningszonen mellan armering och betong.
5) Mekaniska egenskaperna hos vidhäftningszonen mellan förstärkning och betong.

I de beräkningar som redovisas här har hänsyn tagits till betongens arbetskurva vid dragbrott. Betongen har antagits att vara ett linjärt elastiskt material vid tryckbelastning. Armeringen har betraktats som ett idealt elastoplastiskt material. Förstärkningen har antagits att vara ett linjärt elastiskt material vid dragbelastning. Det har antagits att det råder perfekt vidhäftning mellan betong och armering. Det samma gäller mellan förstärkning och betong.

Betongens beteende vid dragbelastning beskrivs med hjälp av figur 17. σ, MPa, respektive f_t, MPa, är spänning respektive betongens draghållfasthet. δ_c, mm, är deformation.

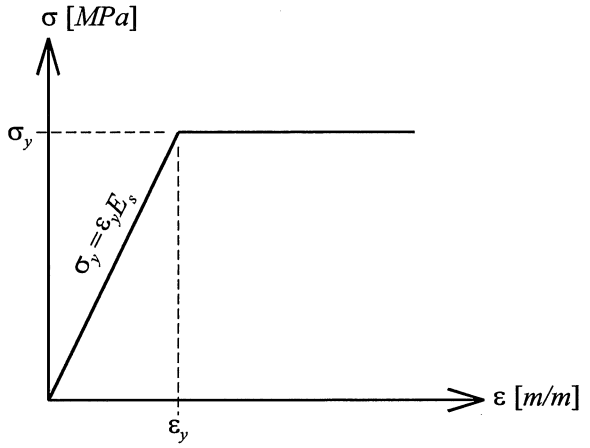
När en betong med arbetskurva enligt figur 17 belastas i deformationskontroll beter sig betongen linjärt elastiskt fram till den deformation som motsvarar betongens draghållfasthet. Vid denna deformation bildas en brottzon, som har liten utsträckning i spänningens riktning. Efter bildandet av brottzonen leder ytterligare ökning av deformationen till att spänningen avtar. All tilläggsdeformation tas upp i brottzonen medan de delar som är utanför denna zon avlastas. δ är den totala deformationen medan w är brottzonens deformation. Som framgår av figuren är w, enligt denna modell, skillnaden mellan den totala deformationen och den elastiska.

För att kunna simulera spricktillväxt i betong måste betongen beskrivas med modeller liknande den som anges i figur 17. Dessa kallas för brottmekaniska modeller som utvecklades under 70 och 80-talen. Modellerna beskrivs inte här, de intresserade hänvisas till referens Petersson (1981), Elfgren (1988) och Hassanzadeh (1992).



Figur 17 Betongens arbetskurva vid dragning.

Armeringen har modellerats som ett idealt elastoplastiskt material såsom beskrivs i figur 18.



Figur 18 Armeringsstålets arbetskurva.

σ_y, MPa, respektive ε_y, m/m, är armeringens flytgräns respektive töjning vid sträckgränsen. E_s är stålets elasticitetsmodul.

7.2 Balkmodellen och beräkningsparametrar

Balken modellerades på samma sätt som visas i figur 4. Symmetrin i geometrin och belastningsfallet utnyttjades, d.v.s. beräkningarna utfördes för halva balklängden. De längsgående armeringarna och byglarna modellerades med hjälp av stångelement. Betongen modellerades med hjälp av 8-nods element. Beräkningarna utfördes för både icke förstärkt och förstärkt balk. Två olika betonghållfastheter användes. Följande data användes.

Tabell 7 Materialdata för beräkningar.

	Betong1		Betong2	
	Icke förstärkt	Förstärkt	Icke förstärkt	Förstärkt
Betong				
E_c, MPa	25000		30000	
f_t, MPa	1.9		2.9	
w_c, mm	0.095		0.0832	
Armeringsstål				
E_s, MPa	200000			
σ_y, MPa	500			
Förstärkning				
E_f, MPa		20000		20000

Beräkningarna har utförts för två olika betonger. Betong1 motsvarar betongen för referensbalken i tabell 5, *vct* = 0.70. E_c och w_c är inte kända. E_c bestämdes med hjälp av figur 10.4:2 i "Betonghandbok Högpresterande betong – Material och utförande". w_c bestämdes med hjälp av CEP-FIP,s formel:

$$G_F = 30 \cdot \left(\frac{f_{c,cyl}}{10} \right)^{0.70} \qquad (2)$$

G_F, N/m, är brottenergi och är ytan under kurvan i figur 17. $f_{c,cyl}$, MPa, är betongens cylinderhållfasthet som beräknas med följande formel:

$$f_{c,cyl} = 0.75 \cdot (f_{c,kub} - 1.64 \cdot s) \qquad (3)$$

$f_{c,kub}$, MPa, är betongens tryckhållfasthet för kubisk provkropp. s, MPa, är standardavvikelsen. 1.64 är faktorn för 95% konfidensintervall vid normalfördelning. 0.75 är formfaktorn för omvandling från kub- till cylinderhållfasthet. Med $f_{c,kub}$ = 32 MPa och s = 1.7 MPa enligt tabell 5 blir $f_{c,cyl}$ = 22 MPa, vilket ger G_F = 50 N/m.

Draghållfastheten, f_t, beräknas med hjälp av spräckhållfastheten, f_{split}, enligt följande formel:

$$f_t = 0.80 \cdot (f_{split} - 1.64 \cdot s) \qquad (4)$$

Med f_{split} och s, enligt tabell 5, beräknas f_t = 1.9 MPa.

w_c kan beräknas med hjälp av formel 5 genom att beräkna ytan under kurvan i figur 17.

$$w_c = \frac{54 \cdot G_F}{15 \cdot f_t} \qquad (5)$$

$$w_c = \frac{54 \cdot 50 \cdot 10^{-3}}{15 \cdot 1.9} = 0.095 \quad mm$$

Betong2,s drag- och tryckhållfasthet är 50% högre än Betong1,s. Betong2,s brottenergi är lika stor som Betong1,s brottenergi vilken medför att betong2,s w_c är lägre än Betong1,s w_c, d.v.s. Betong2 är sprödare än Betong1.

I de ovanstående beräkningarna har hänsyn tagits till spridningen hos draghållfastheten. Anledningen är att i de fall då sprickbildningen sker inom ett relativt stort område styrs områdets beteende vid dragbrott av den lägsta draghållfastheten.

I tabell 7 har förstärkningens elasticitetsmodul, E_f, satts till 20000 MPa. Förstärkningens verkliga elasticitetsmodul är 234000 MPa. Vidhäftningszonen mellan förstärkningen och betongen har inte modellerats samt det har antagits att det råder perfekt vidhäftning mellan förstärkningen och betongen. Därför har elasticitetsmodulen reducerats för att ta hänsyn till inverkan den zon som finns mellan betongen och förstärkningen. Zonen består av lim och betong som har relativt låg styvhet.

7.3 Resultaten av beräkningarna

Resultaten framgår av figur 19 och 20. I figur 19 visas beräkningar utförda för de icke förstärkta balkarna. I figuren visas även provningsresultatet för icke förstärkt referensbalk med $vct = 0.70$.

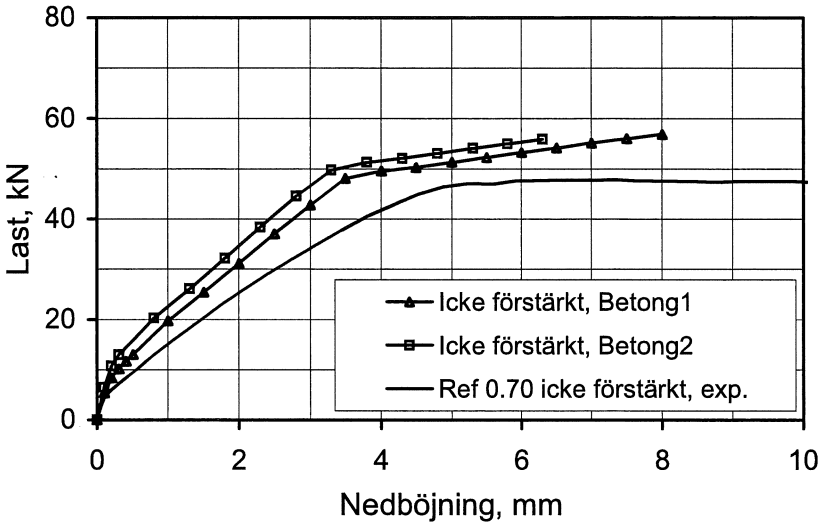
I figur 20 visas beräkningar utförda för de förstärkta balkarna. I figuren visas även provningsresultatet för förstärkt referensbalk med $vct = 0.70$ samt förstärkt frysbelastad torr balk med $vct = 0.70$, blandning 2 i tabell 1 och 5.

Som framgår av figur 19 är de beräknade kurvorna något styvare än den experimentella. Skillnaden beror på att modellen förutsätter att det råder perfekt vidhäftning mellan betongen och armeringen. Modellen förutsätter även perfekt vidhäftning mellan den längsgående armeringen och byglarna. Betongens mekaniska egenskaper har inte så stor inverkan, vilken kan observeras om resultatet för Betong1 jämförs med Betong2.

En annan orsak kan möjligen vara att modellens geometri såsom armeringens placering, balkens dimensioner, m.m. avviker från den verkliga provkroppens.

Enligt beräkningar uppnås armeringens flytgräns vid 50 kN vilken är något högre än den experimentella. Skillnaden är inte stor. Även i detta fall har betongens mekaniska egenskaper inte någon större inverkan. Detta bekräftas även av figur 8 och 9.

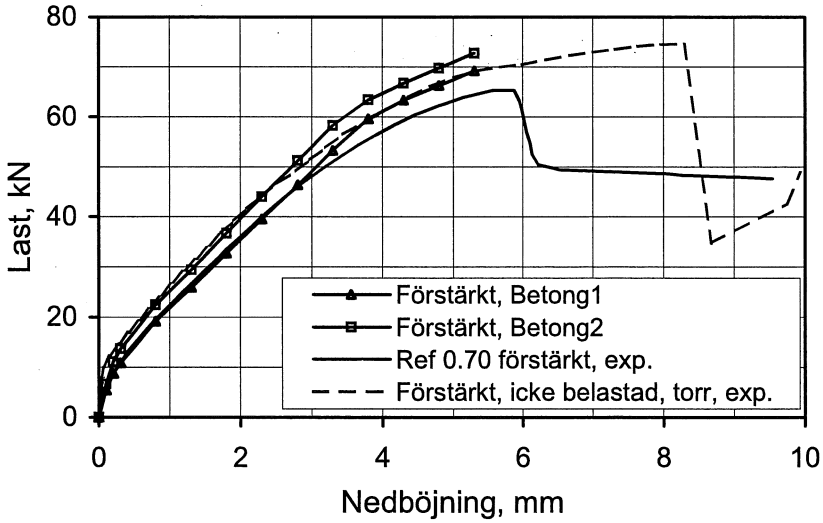
Beräkningarna spårar ur när armeringens flytgräns uppnås vilket beror på modellens brister såsom beskrevs ovan.



Figur 19 Beräkningsresultat, betong1 och betong2, och provningsresultat, exp, för icke förstärkta balkar.

När det gäller de förstärkta balkarna råder god överensstämmelse mellan beräkningarna och provningsresultaten upp till maximumlasten. Strax före maximum lasten spårar beräkningarna ur. Även i detta fall är modellen bristfällig. Orsakerna har nämnts ovan och kommer att diskuteras mera längre fram.

Även i detta fall har betongens mekaniska egenskaper inte så stor inverkan på balkarnas beteende fram till de höga belastningsnivåerna. Fram till dessa områden är det förstärkningen som står för sammanhållningen. Förstärkningens sammanhållningsförmåga styrs dock av betongens mekaniska egenskaper som ökar i betydelse vid de höga belastningsnivåerna. Därför finns en stor skillnad mellan de två provningsresultaten som visas i figuren. Den balk som visar högre bärförmåga och deformationsförmåga är starkare än den andra.



Figur 20 Beräkningsresultat, betong1 och betong2, och provningsresultat, exp, för förstärkta balkar.

I figur 21 visas huvuddragspänningarna vid olika lastnivåer. Som framgick ovan har beräkningarna utförts för halva balken, d.v.s. symmetrin har utnyttjats. I varje delfigur är den vänstra delen upplaget. Den högra delen är symmetrisnittet. Huvudspänningarna avser dragspänningar i betongen.

När det gäller den icke förstärkta betongen är spänningarna störst vid symmetrisnittet i den nedre delen av balken. Vid ökad belastning spricker betongen som leder till avlastning av betongen i den nedre delen av balken. Vid den högsta belastningen är betongen vid symmetrisnittets nedre del så pass sprucken att den är spänningsfri.

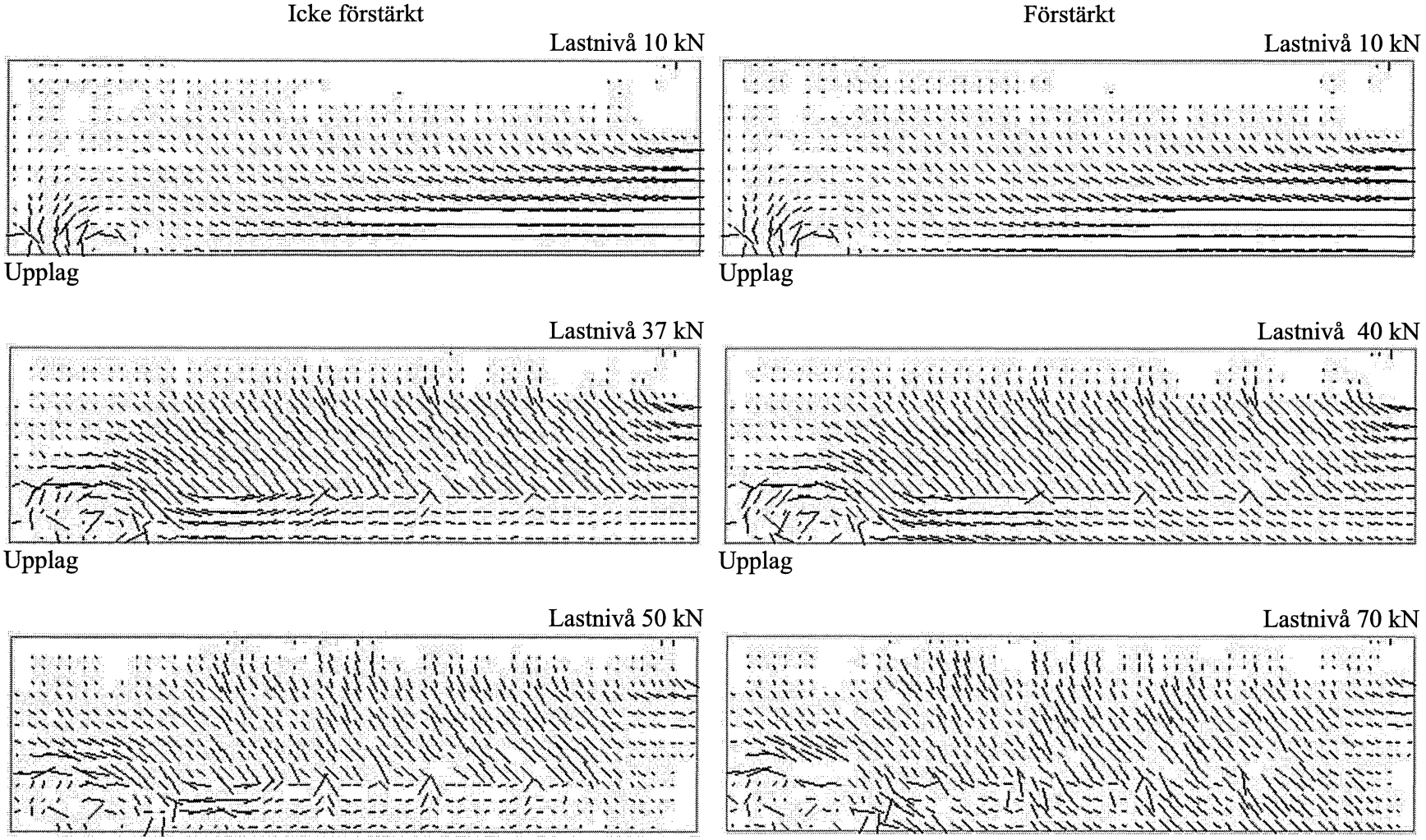
I de inre delarna av balken ökar dragspänningarna, de sneda huvudspänningsriktningarna. Om balken inte hade byglar skulle dessa spänningar leda till att skjuvbrott inträffade. På grund av att det finns tillräckligt med byglar så inträffar inte skjuvbrottet. Betongen vid dessa områden spricker något vilket leder till att betongen avlastas något vid de högre lastnivåerna.

Spänningarna i täckskiktet är parallella med armeringen vilken leder till sprickbildning vinkelrätt mot balken längdaxel. Som framgår av figuren ändras spänningarnas riktning ovanför den längsgående armeringen.

Den förstärkta balken beter sig i stort sett på samma sätt som den icke förstärkta. Skillnaden är spänningarna inom täcksiktet. Vid 40 kN lastnivå kan sneda huvudspänningar observeras inom täckskiktet. Som framgår av figuren kan spänningarna anses vara fortsättningen på de sneda spänningar som förekommer i de inre delarna. Spänningarna inom täckskiktet ansträngер vidhäftningszonen mellan förstärkningen och betongen. Detta fenomen leder till ökad styvhet hos balken men vid ett senare skede medför detta att en del av täckskiktet dras loss så som har observerats vid provningarna.

På grund av att modellen förutsätter perfekt vidhäftning mellan betong och armering dras betongen inte loss vid beräkningarna vilket leder till att beräkningarna spårar ur.

Beräkningar som utförs med linjärelastiska modeller uppvisar spänningskoncentrationer vid förstärkningens ändpunkter när upplagen. De beräkningar som redovisas här är utförda med en icke linjär modell vilken tar hänsyn till mikrosprickbildning som in sin tur leder till att materialet "mjuknar". Mikrosprickbildningen leder till att spänningarna reduceras.



Figur 21 Huvuddragspänningar vid olika lastnivåer.

8 DISKUSSIONER

Syftet med undersökningen var att studera inverkan av kombinerad fukt, låg temperatur, temperaturgradient och mekanisk belastning på bärförmågan hos balkar förstärkta med kolfiberkomposit. Vad det gäller balkar använda vid denna undersökning kan följande observationer göras:

Fukt, frost, temperaturgradient och mekanisk belastning under frysning och upptining har inte påverkat de icke förstärkta balkarnas bärförmåga, jämför resultaten i figur 8 och 9. Anledningen är att balkarna var armerade på både drag- och trycksidan, vilket medför att eventuella förändringar i betongens tryckhållfasthet, orsakad av skador eller ojämn betongkvalitet, inte hade någon märkbar effekt på balkarnas bärförmåga. Balkarna var även armerade med byglar vilket förebyggde skjuvbrottet.

Kombinationen fukt och frysning har en märkbar effekt på de förstärkta balkarnas nedböjning vid brottlast, se figur 8, 9 och 10. Nedböjningen vid brottlast är klart lägre hos de balkar som, före frysning hade lagrats i vatten jämfört med de balkar som var konditionerade i laboratoriet.

Det är inte möjligt att dra slutsatser när det gäller inverkan av frostens varaktighet och temperaturgradienten. Balkarna i figur 10*a*, ej belastade förstärkta balkar, har varit utsatta för lägre temperaturer och under längre tid jämfört med balkar i figur 10*b*, belastade och förstärkta balkar. Temperaturgradienten har, dessutom, varit större hos balkarna i figur 10*a* jämfört med de i figur 10*b*. Skillnaderna mellan bärförmåga samt nedböjning vid brottlasten är små. En liten skillnad kan noteras när det gäller de "Torra" balkarna. Det kan bero på att brottutseendet hos dessa balkar skiljer sig från varandra. Balken i figur 10*a* har brustit som följd av dragbrott i betongen medan balken i figur 10*b* har brustit p.g.a. av vidhäftningsbrott, se figur 13*c* och 14*c*.

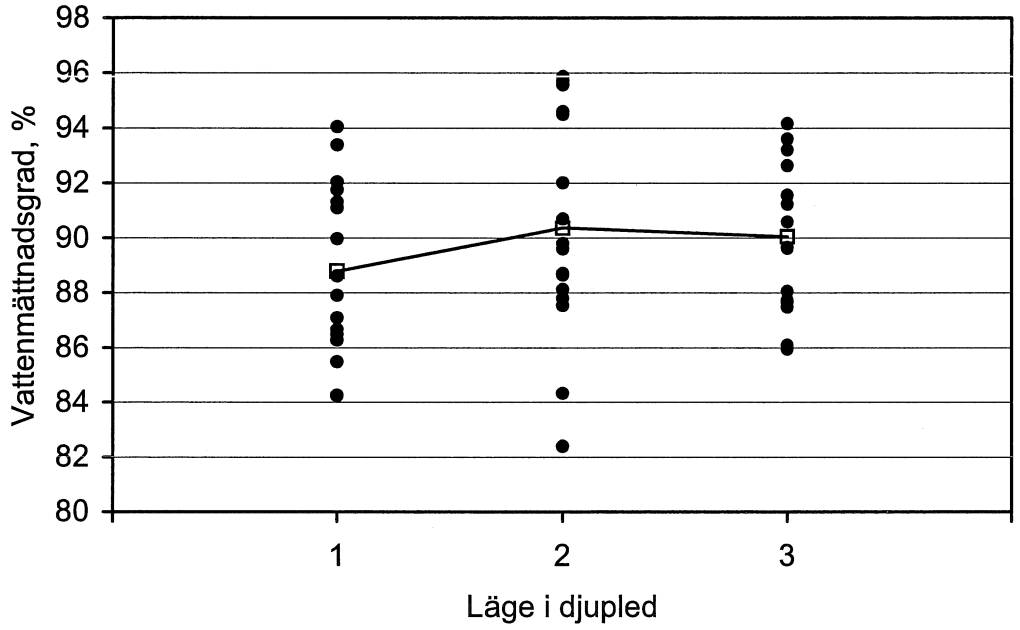
En anledning till minskning av bär- och nedböjningsförmågan orsakad av fukt i kombination med frysning kan vara att betongens draghållfasthet reduceras p.g.a. fukt och frysning. Detta kan observeras om kurvan för den förstärkta referensbalken, som har lägre draghållfasthet än de övriga, jämförs med de övriga förstärkta balkarnas kurvor. Som framgår av figurerna visar samtliga balkar högre brottlast och högre nedböjning vid "Torrt-" tillstånd jämfört med de fall de är vattenlagrade. De senare fallen uppvisar i stort sett samma brottbeteende som den förstärkta referensbalken.

En annan anledning kan vara att vidhäftningen mellan armering (både skjuv- och längsgående armering) och betong försämrades på grund av fukt och frysning. Försämrad vidhäftning kan medföra att armeringen inte förmådde att hålla samman betongen.

Det finns ingen indikation på att vidhäftningen mellan betongen och kolfiberkompositen har försämrats. Denna effekt är inte mätbar eftersom betongen i de flesta fall har brustit på grund av dragbrott.

De flesta balkars vattenmättnadsgrad har varit relativt låg. Anledningen är att balkarna vattenlagrades under kort tid. Det är inte möjligt att observera någon inverkan av temperaturgradient på fuktfördelningen i balkarna. I figur 22 visas vattenmättnadsgraden för förstärkta balkar vid tre nivåer. Nivå 1 är den övre tredjedelen, nivå 2 är den mittersta tredjedelen och

nivå 3 är den nedre tredjedelen. I figuren visas även medelvärdena för samtliga nivåer. Som framgår av figuren kan en mycket svag tendens till ansamling av fukt i de nedre delarna observeras. Det bör noteras att på grund av den stora spridningen är resultatet inte statistiskt signifikant.



Figur 21 Vattenmättnadsgrad vid olika nivåer.

9 SLUTSATSER

När det gäller balkar använda vid denna undersökning leder resultaten till följande slutsatser:

- Fukt, frost, temperaturgradient och mekanisk belastning under frysning och upptining har inte haft inverkan på de icke förstärkta balkarnas bärförmåga.

- Kombinationen fukt och frysning har en märkbar effekt på de förstärkta balkarnas nedböjning vid brottlast, vilken kan bero på reduktion av betongens draghållfasthet och försämrad vidhäftning mellan betong och armering.

- Det är inte möjligt att dra slutsatser vad gäller inverkan av frostens varaktighet och temperaturgradienten på balkarnas bärförmåga.

- Det finns ingen indikation på att vidhäftningen mellan betongen och kolfiberkompositen har försämrats.

- Det är inte möjligt att observera någon inverkan av temperaturgradient på fuktfördelningen i balkarna.

10 REFERENSER

Elfgren, L. (1988) **Fracture Mechanics of Concrete.** RILEM-REPORT, Chapman and Hall.

Hassanzadeh, M. (1992) **Behaviour of fracture process zones in concrete influenced by simultaneously applied normal and shear displacements**. Report TVBM-1010, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.

Hassanzadeh, M. (2000) **Beständighet hos kompositmaterial för infrastrukturkonstruktioner**, Rapport U00.07, Avdelningen för Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola.

Hassanzadeh, M. (2000) **Frostbeständighet hos kolfiberförstärkta betongkonstruktioner**, Rapport U00.06, Avdelningen för Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola.

Petersson, P. E. (1981) **Crack Growth and Development of Fracture Zones in Plain Concrete and Similar Materials**. Report TVBM-1006, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.

Täljsten, B. (2001) **INTERREG, Uppgradering och övervakning av bygg- och anläggningskonstruktioner**. 2001:06, Institutionen för Väg- och vattenbyggnad, Avdelningen för Konstruktionsteknik, Luleå Tekniska Universitet.

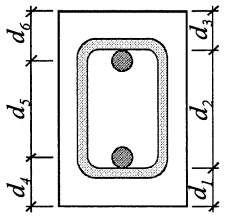
Täljsten B. (2002) **FRP Strengthening of existing concrete structures - Design Guidelines.** Luleå University of Technology, Division of Structural Engineering, p 220, 2002, under printing.

BETONGENS SAMMANSÄTTNING

Gjutning av Referensbalkar vct 0.70 2000-03-17

Referens1: Obelastade icke förstärkt balk
Referens2: Obelastade förstärkt balk

En balk av varje



	d1, mm	d2, mm	d3, mm	d4, mm	d5, mm	d6, mm
FB251	32	85	32	40	70	40
	31	85	32	39	71	40
FB252	33	84	35	41	66	43
	33	84	35	41	66	43
		Medelvärde =		40	68	42

Recept
Blandad sats = 60 l

	kg/m3	kg/sats	Fukt %	
Cement:	274	16.4		
Vatten:	192	11.5		Vattnet i blandningssatsen
Grus 0-8:	1027	61.6	1.3	kompenserades för
Makadam 8-12:	403	24.2	0.2	ballastens fukt
Makadam 12-16:	403	24.2	0.2	Grusets verkliga fukt var 1.55% vilket medför vct 0.71
Sättmått, mm:	125			
Lufthalt, %:	1.7			
Densitet, kg/m3:	2329			

Tryck- och spräckprov Utförandedatum: 2001-08-27
Tryckprov utfördes med 150x150x150 mm kuber.
Spräckprov utfördes med 200x100 mm cylindrar

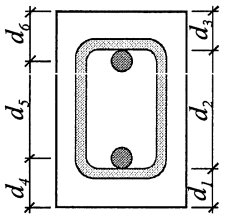
	Vikt, kg	Tryckhållf., MPa		Vikt, kg	Spräckhållf., MPa	
1	7.565	33.6		3.513	2.5	
2	7.602	30.4		3.514	2.9	
3	7.743	33		3.518	2.6	
	7.637	32.3	1.7	3.515	2.7	0.2

Gjutning av FB21 och FB22 2000-03-10

FB21: Obelastad icke förstärkta balkar
FB22: Obelastad förstärkta balkar

Tre balkar av varje: FB211, FB212, FB213 och FB221, FB222, FB223

1: Provkropp med tillgång till vatten
2: Provkropp vattenlagrad en vecka
3: Torr provkropp



	d1, mm	d2, mm	d3, mm	d4, mm	d5, mm	d6, mm
FB211	31	88	31	39	72	39
	32	88	30	40	72	38
FB212	30	89	31	38	73	39
	30	89	31	38	73	39
FB213	30	88	32	38	72	40
	30	88	32	38	72	40
FB221	30	90	30	38	74	38
	31	89	30	39	73	38
FB222	30	89	31	38	73	39
	32	86	32	40	70	40
FB223	32	88	30	40	72	38
	31	88	31	39	72	39
		Medelvärde =		39	72	39

Recept
Blandad sats = 140 l

	kg/m3	kg/sats	Fukt %	
Cement:	274	38.4		
Vatten:	192	26.9		Vattnet i blandningssatsen
Grus 0-8:	1027	143.8	3.42	kompenserades för
Makadam 8-12:	403	56.4	0.2	ballastens fukt
Makadam 12-16:	403	56.4	0.2	

Sättmått, mm:	45
Lufthalt, %:	2.7
Densitet, kg/m3:	2305

Tryck- och spräckprov Utförandedatum: 2001-08-29
Tryckprov utfördes med 150x150x150 mm kuber.
Spräckprov utfördes med 200x100 mm cylindrar

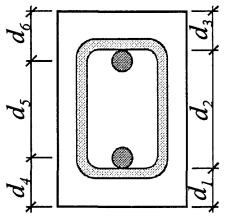
	Vikt, kg	Tryckhållf., MPa		Vikt, kg	Spräckhållf., MPa	
1	7.656	53.3		3.586	4.9	
2	7.715	55.9		3.592	5.3	
3	7.833	56.1		3.580	5.1	
	7.735	55.1	1.6	3.586	5.1	0.2

Gjutning av FB25 och FB26 2000-09-26

FB25: Belastad icke förstärkta balkar
FB26: Belastad förstärkta balkar

Tre balkar av varje: FB251, FB252, FB253 och FB261, FB262, FB263

1: Provkropp med tillgång till vatten
2: Provkropp vattenlagrad en vecka
3: Torr provkropp



	d1, mm	d2, mm	d3, mm	d4, mm	d5, mm	d6, mm
FB251	31	88	32	39	71	40
	30	89	31	38	73	39
FB252	31	88	33	39	70	41
	30	90	32	38	72	40
FB253	31	89	32	39	71	40
	31	89	32	39	71	40
FB261	30	88	30	38	74	38
	30	87	32	38	72	40
FB262	33	81	34	41	67	42
	31	85	34	39	69	42
FB263	30	88	33	38	71	41
	30	89	31	38	73	39
		Medelvärde =		39	71	40

Recept
Blandad sats = 140 l

	kg/m3	kg/sats	Fukt %	
Cement:	274	38.4		
Vatten:	192	26.9		Vattnet i blandningssatsen
Grus 0-8:	1027	143.8	0.7	kompenserades för
Makadam 8-12:	403	56.4	0.2	ballastens fukt
Makadam 12-16:	403	56.4	0.2	

Sättmått, mm:	85
Lufthalt, %:	2.9
Densitet, kg/m3:	2329

Tryck- och spräckprov Utförandedatum: 2001-03-06
Tryckprov utfördes med 150x150x150 mm kuber.
Spräckprov utfördes med 200x100 mm cylindrar

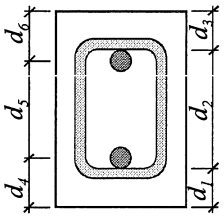
	Vikt, kg	Tryckhållf., MPa		Vikt, kg	Spräckhållf., MPa	
1	7.749	42		3.507	3.9	
2	7.617	41.3		3.534	3.7	
3	7.544	39.5		3.551	3.5	
	7.637	40.9	1.3	3.531	3.7	0.2

Gjutning av ExFB22 och ExFB26, Extera serie 2001-02-03

ExFB22: Obelastad förstärkta balkar
ExFB26: Belastad förstärkta balkar

Tre balkar av varje: ExFB221, ExFB222, ExFB223 och ExFB261, ExFB262, ExFB263

1: Provkropp med tillgång till vatten
2: Provkropp vattenlagrad en vecka
3: Torr provkropp



	d1, mm	d2, mm	d3, mm	d4, mm	d5, mm	d6, mm
FB251	33.5	87	30.5	41.5	70	38.5
	31.5	88	32	39.5	70.5	40
FB252	31.5	89	32	39.5	70.5	40
	34	86	31	42	69	39
FB253	31.5	89	31	39.5	71.5	39
	32.5	88	32	40.5	69.5	40
FB261	34	88	33	42	67	41
	31	87	31	39	72	39
FB262	32.5	87	34	40.5	67.5	42
	31	89	31.5	39	71.5	39.5
FB263	31.5	89	34	39.5	68.5	42
	30	88	30.5	38	73.5	38.5
		Medelvärde =		40	70	40

Recept
Blandad sats = 140 l

	kg/m3	kg/sats	Fukt %	
Cement:	274	38.4		
Vatten:	192	26.9		Vattnet i blandningssatsen
Grus 0-8:	1027	143.8	0.4	kompenserades för
Makadam 8-12:	403	56.4	0.1	ballastens fukt
Makadam 12-16:	403	56.4	0.1	

Sättmått, mm:	60
Lufthalt, %:	2.3
Densitet, kg/m3:	2321

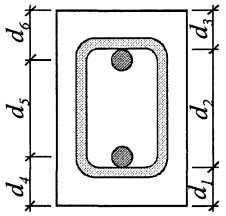
Tryck- och spräckprov Utförandedatum: 2001-03-06
Tryckprov utfördes med 150x150x150 mm kuber.
Spräckprov utfördes med 200x100 mm cylindrar

	Vikt, kg	Tryckhållf., MPa		Vikt, kg	Spräckhållf., MPa	
1	7.717	37		3.577	3.4	
2	7.668	36.4		3.523	3.7	
3	7.702	36.7		3.524	3.4	
	7.696	36.7	0.3	3.541	3.5	0.2

Gjutning av Referensbalkar vct 0.50 2000-03-17

Referens3: Obelastad icke förstärkt balk
Referens4: Obelastad förstärkt balk

En balk av varje



	d1, mm	d2, mm	d3, mm	d4, mm	d5, mm	d6, mm
FB251	33	83	33	41	68	41
	33	83	34	41	67	42
FB252	32	86	34	40	68	42
	32	83	35	40	67	43
		Medelvärde =		41	68	42

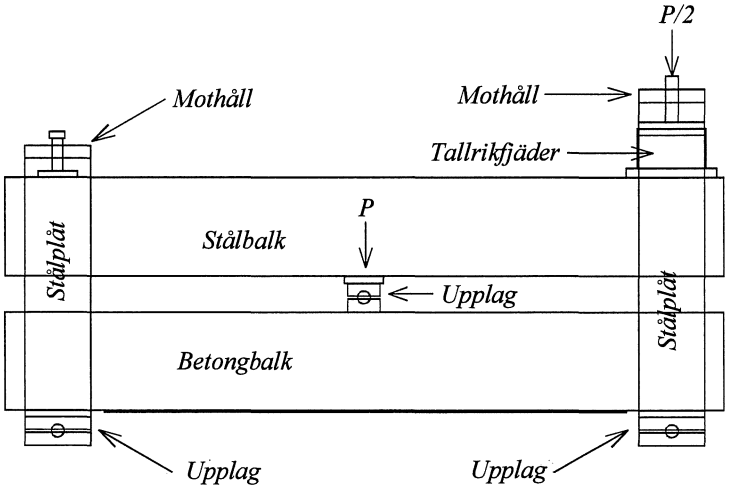
Recept
Blandad sats = 60 l

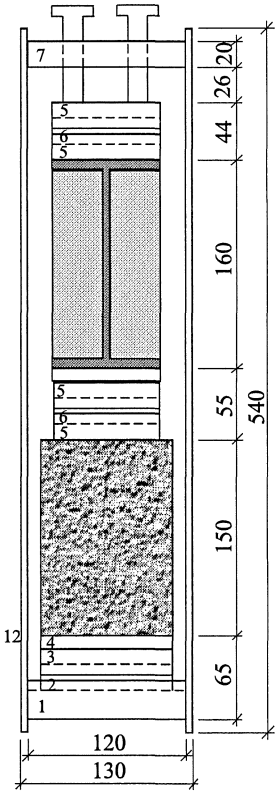
	kg/m3	kg/sats	Fukt %	
Cement:	411	24.7		
Vatten:	205.5	12.3		Vattnet i blandningssatsen
Grus 0-8:	902	54.1	1.3	kompenserades för
Makadam 8-12:	391	23.5	0.2	ballastens fukt
Makadam 12-16:	409	24.5	0.2	Grusets verkliga fukt var 1.55% vilket medför vct 0.51
Sättmått, mm:	120			
Lufthalt, %:	2.4			
Densitet, kg/m3:	2319			

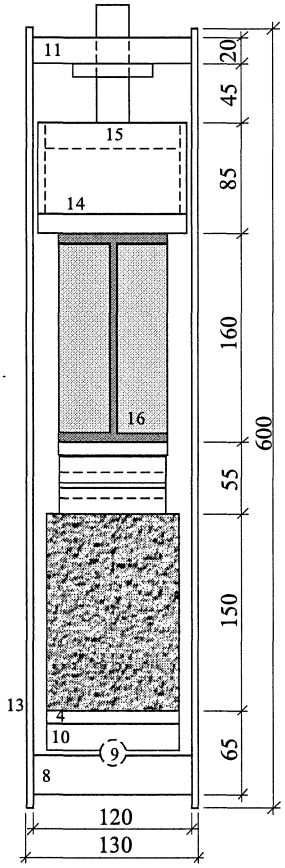
Tryck- och spräckprov Utförandedatum: 2001-08-27
Tryckprov utfördes med 150x150x150 mm kuber.
Spräckprov utfördes med 200x100 mm cylindrar

	Vikt, kg	Tryckhållf., MPa		Vikt, kg	Spräckhållf., MPa	
1	7.864	55.8		3.569	3.8	
2	7.713	58.4		3.613	4.0	
3	7.821	56.3		3.583	4.0	
	7.799	56.8	1.4	3.588	3.9	0.1

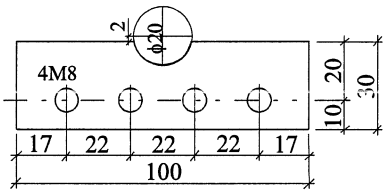
BELASTNINGSUTRUSTNING





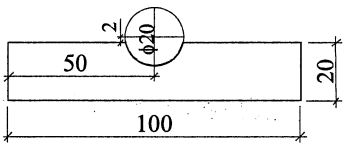


(1) Upplag, längd = 120 mm, bredd = 100 mm



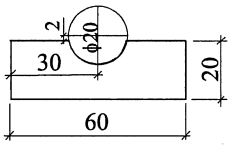
(2) Rund stång längd = 100 mm, Diameter = 20 mm

(3) Upplag, längd = 100 mm, bredd = 100 mm



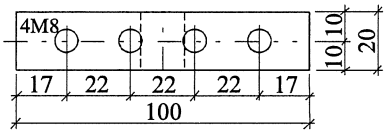
(4) Platta, 100 x 100 x 10

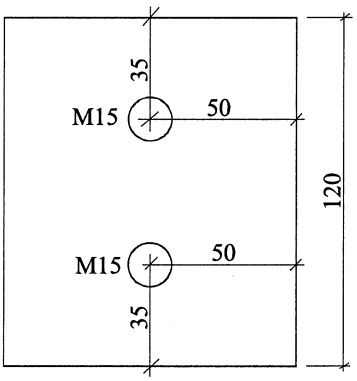
(5) Upplag, längd = 80 mm, bredd = 60 mm



(6) Rund stång längd = 80 mm, Diameter = 20 mm

(7) Upplag, längd = 120 mm, bredd = 100 mm

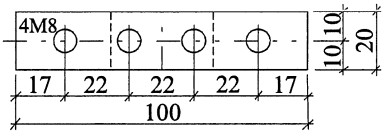


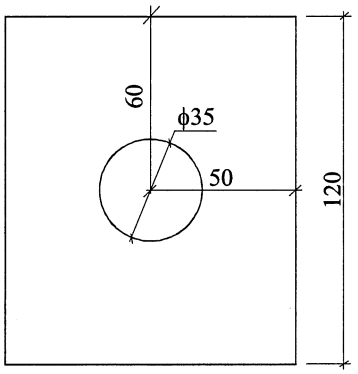


(8) och (10) Samma som (1) och (3) fast kula i stället för stång

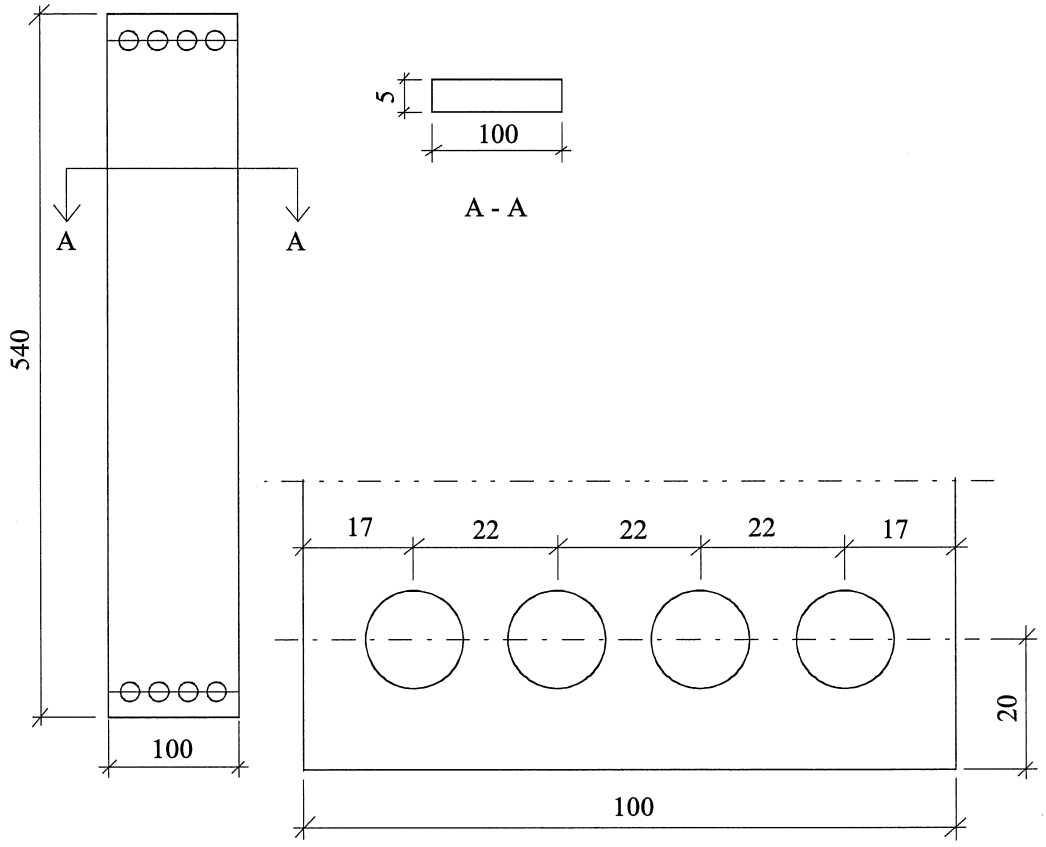
(9) Kula, diameter = 20 mm

(11) Upplag, längd = 120 mm, bredd = 100 mm

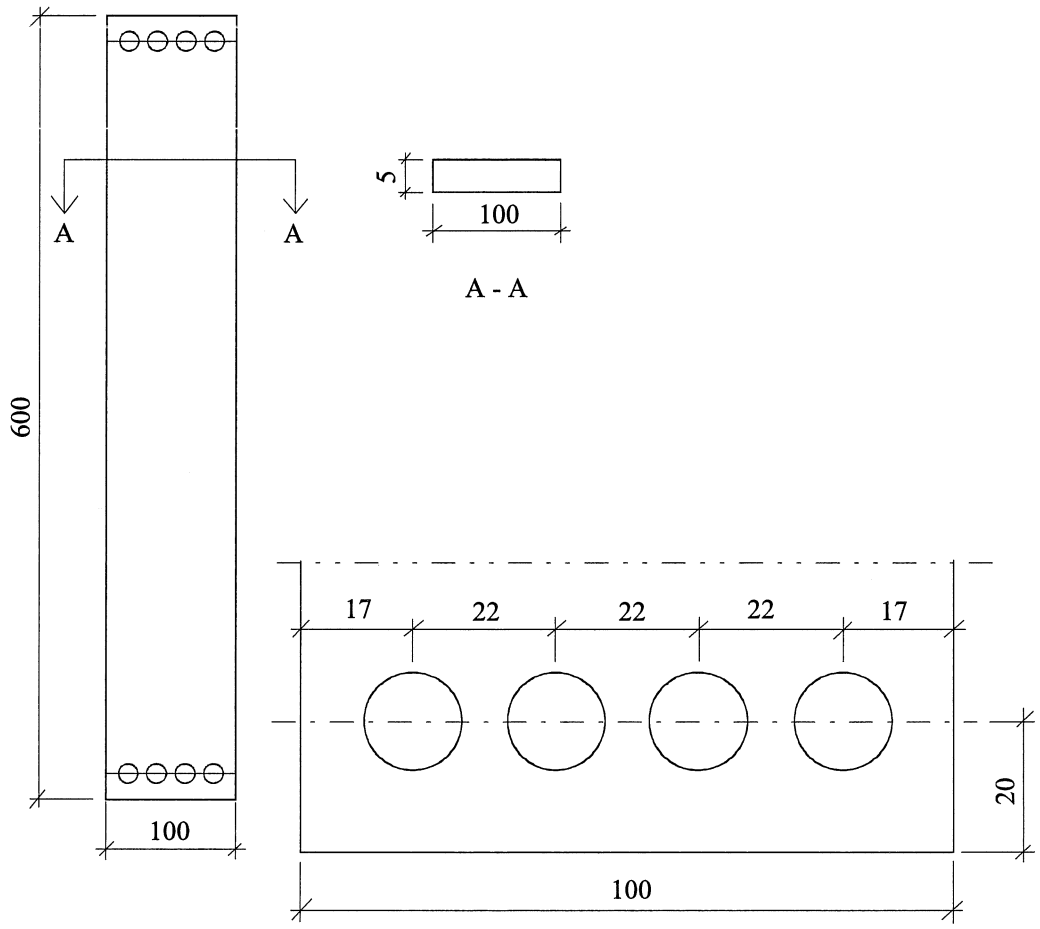




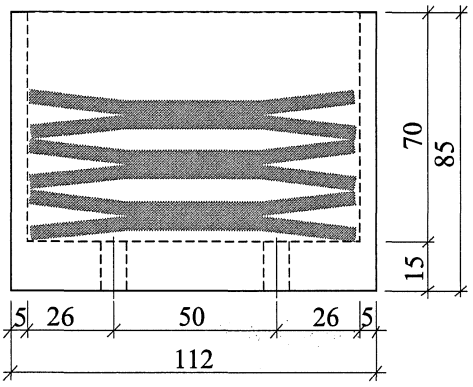
(12)

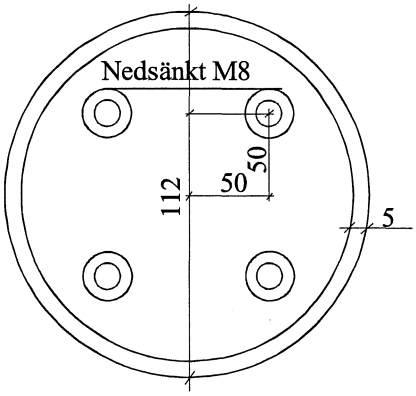


(13)

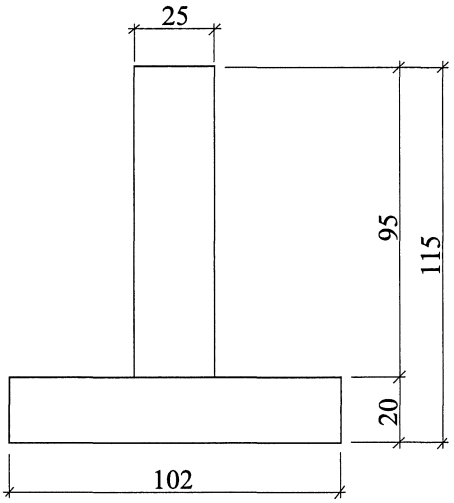


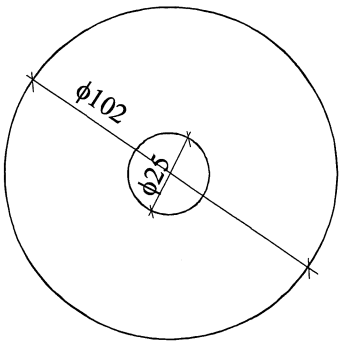
(14)


70
85
15
5
26
50
26
5
112

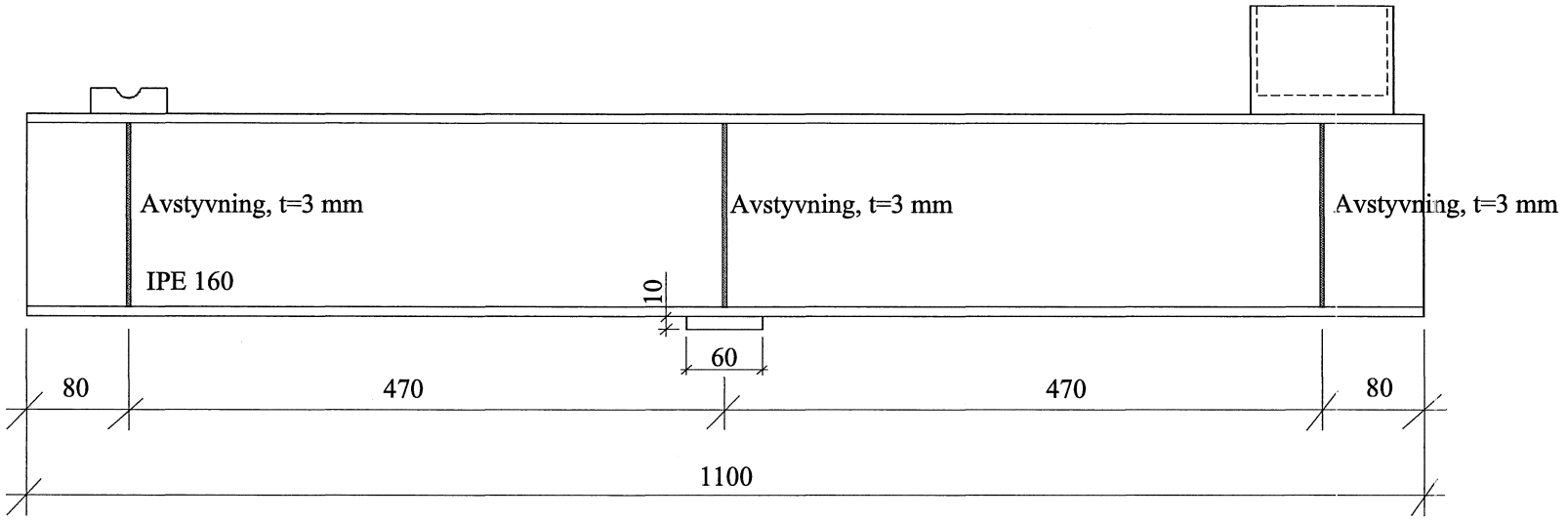

Nedsänkt M8
50
50
112
5

(15)

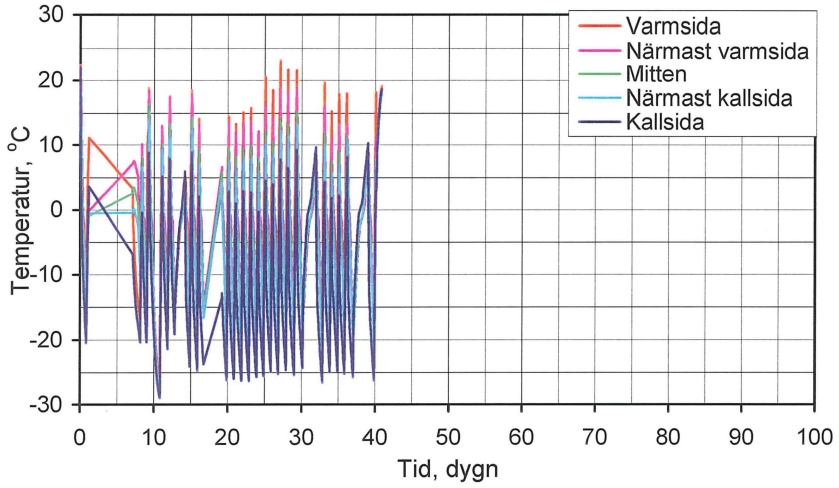

25
95
115
20
102


ϕ102
ϕ25

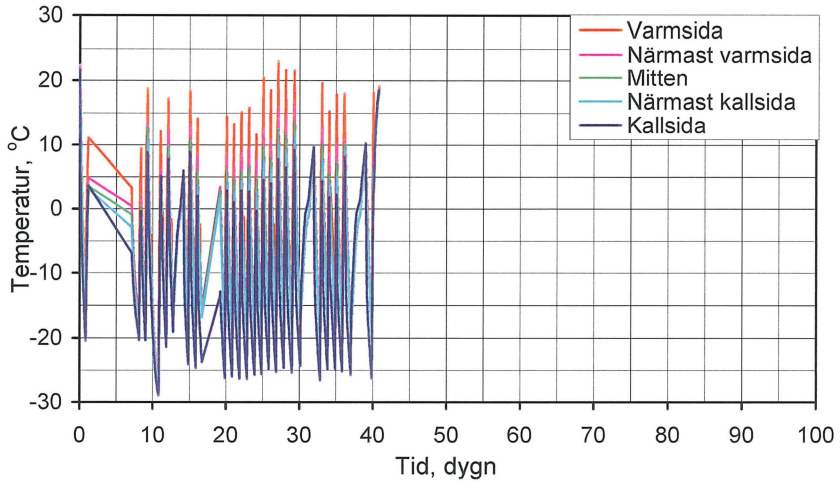
(16)


Avstyvning, t=3 mm
Avstyvning, t=3 mm
Avstyvning, t=3 mm
IPE 160
10
60
80
470
470
80
1100

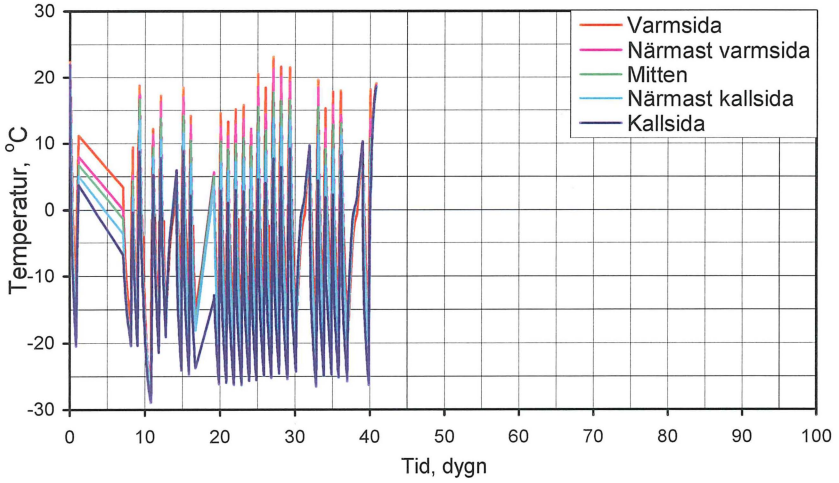
BELASTNINGSUTRUSTNING



(OI-a)



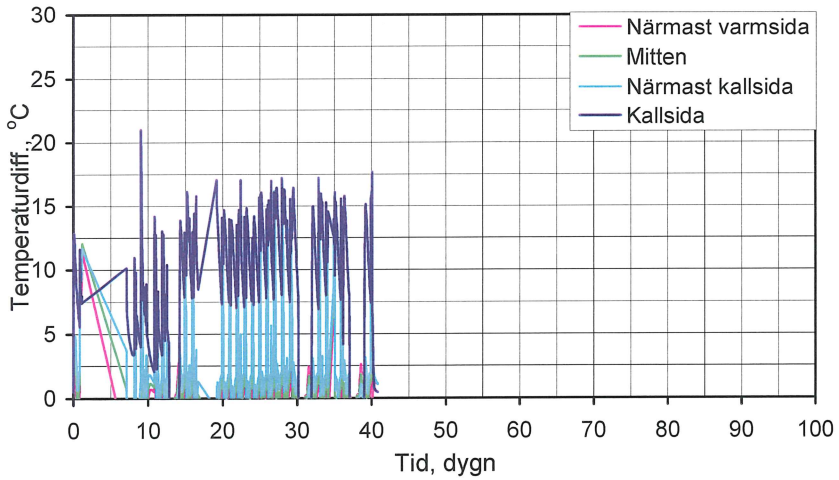
(OI-b)



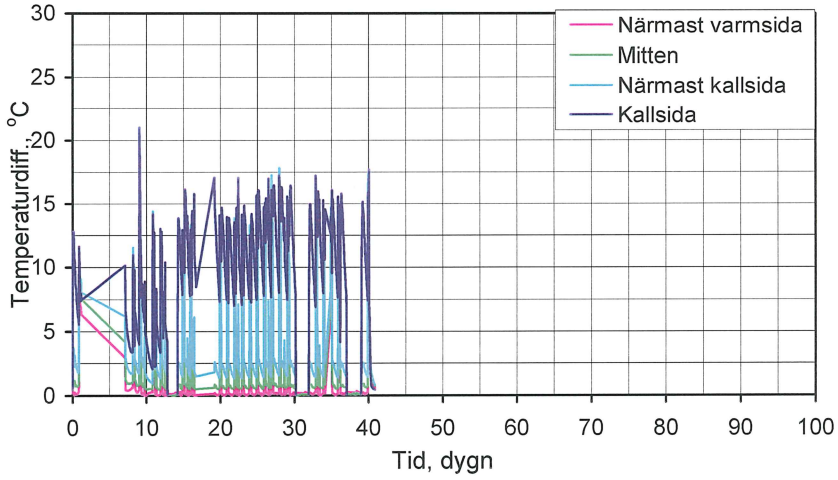
(OI-c)

Obelastade icke förstärkta balkar, vct = 0.70.

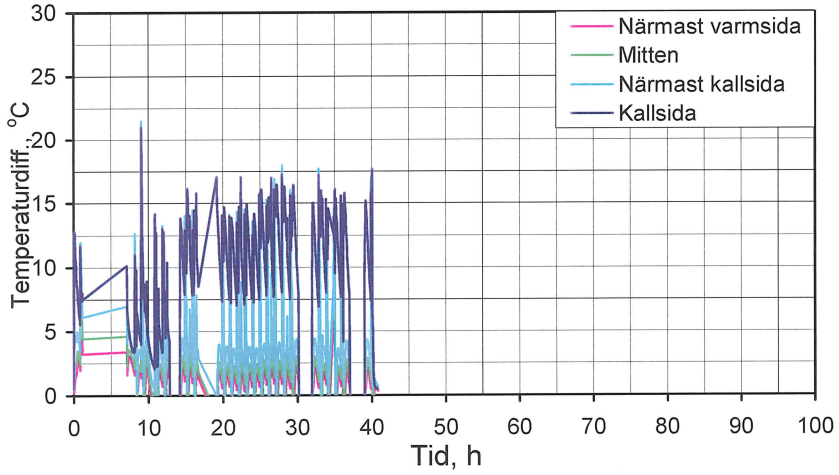
(OI-a) Vattenlagrad med tillgång till vatten på den varma sidan.
(OI-b) Vattenlagrad utan tillgång till vatten.
(OI-c) Torr.



(OI-d)



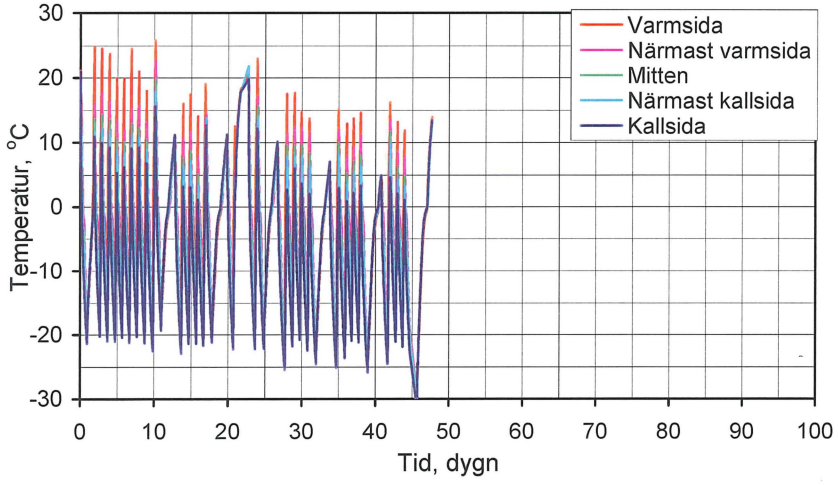
(OI-e)



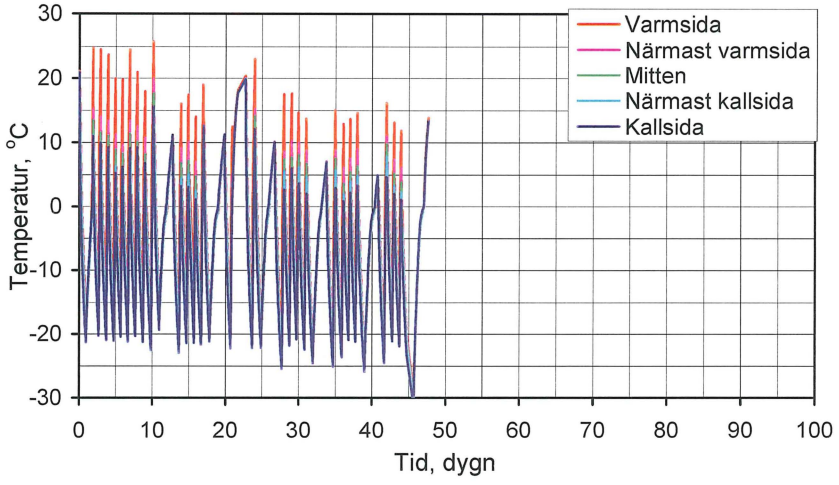
(OI-f)

Obelastade icke förstärkta balkar, vct = 0.70.

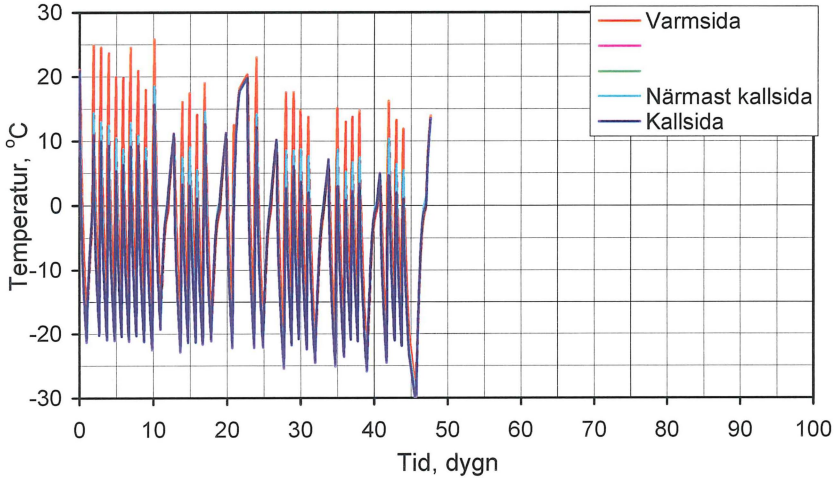
(OI-d) Vattenlagrad med tillgång till vatten på den varma sidan.
(OI-e) Vattenlagrad utan tillgång till vatten.
(OI-f) Torr.



(OF-a)



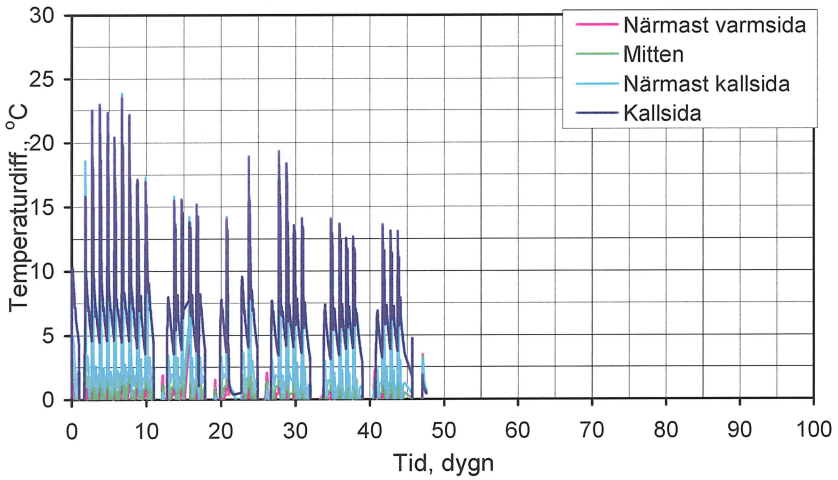
(OF-b)



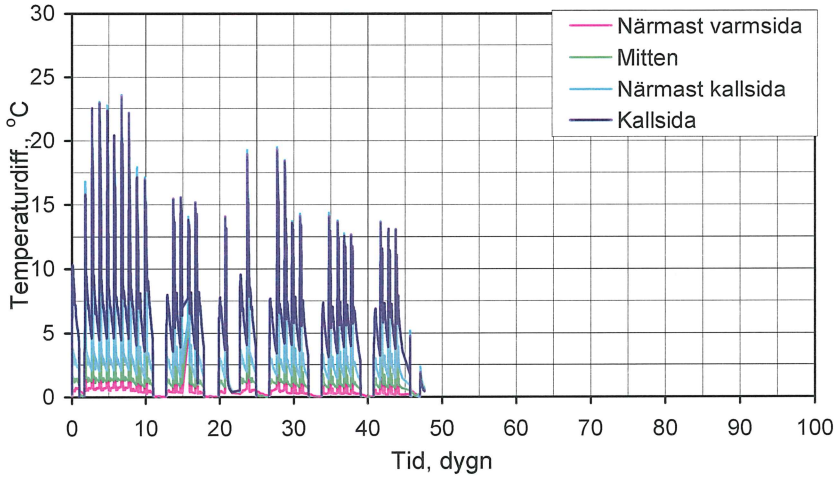
(OF-c)

Obelastade förstärkta balkar, vct = 0.70.

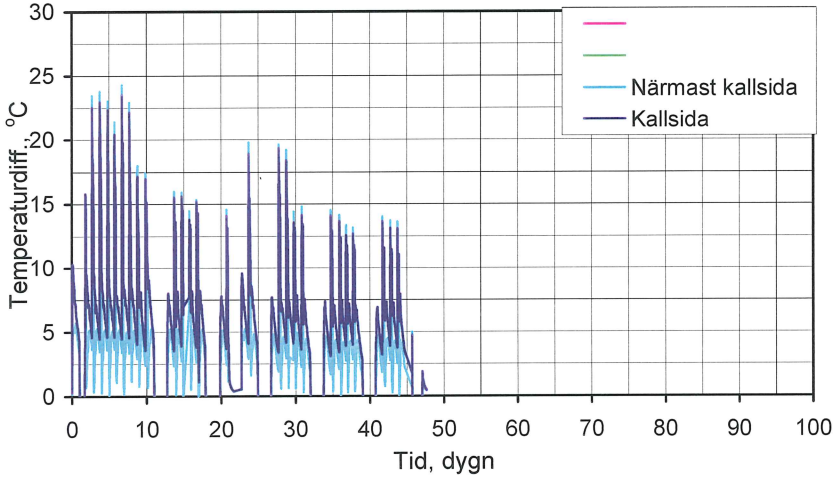
(OF-a) Vattenlagrad med tillgång till vatten på den varma sidan.
(OF-b) Vattenlagrad utan tillgång till vatten.
(OF-c) Torr.



(OF-d)



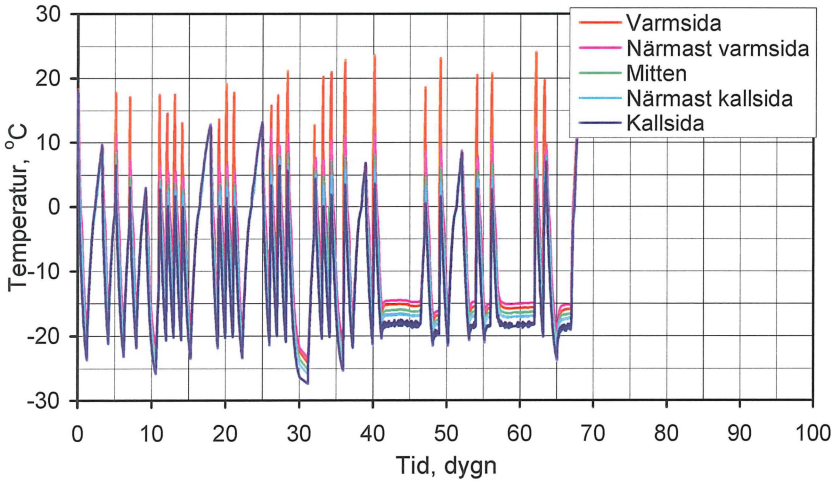
(OF-e)



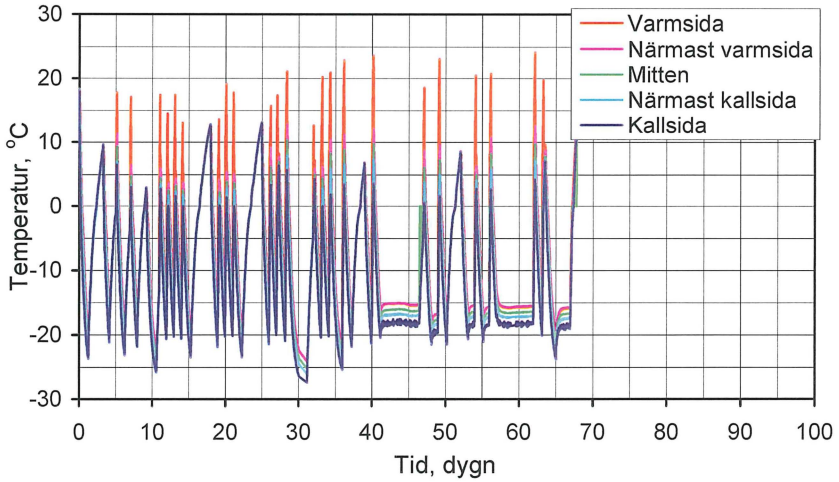
(OF-f)

Obelastade förstärkta balkar, vct = 0.70.

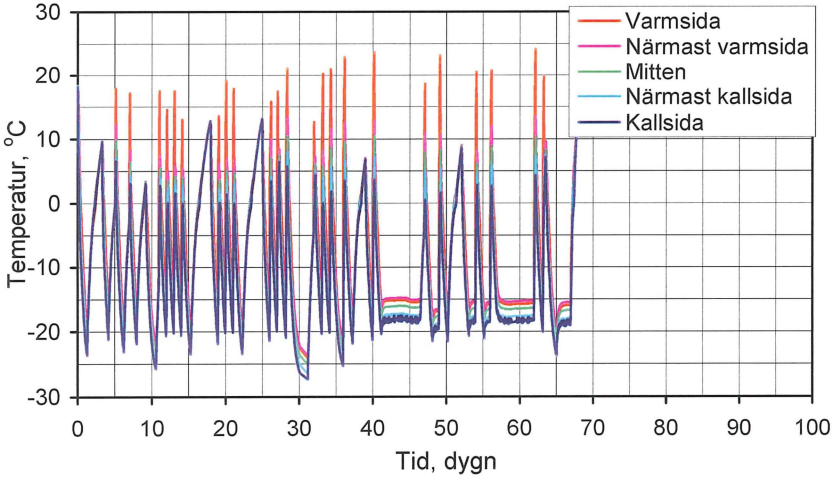
(OF-d) Vattenlagrad med tillgång till vatten på den varma sidan.
(OF-e) Vattenlagrad utan tillgång till vatten.
(OF-f) Torr.



(BI-a)



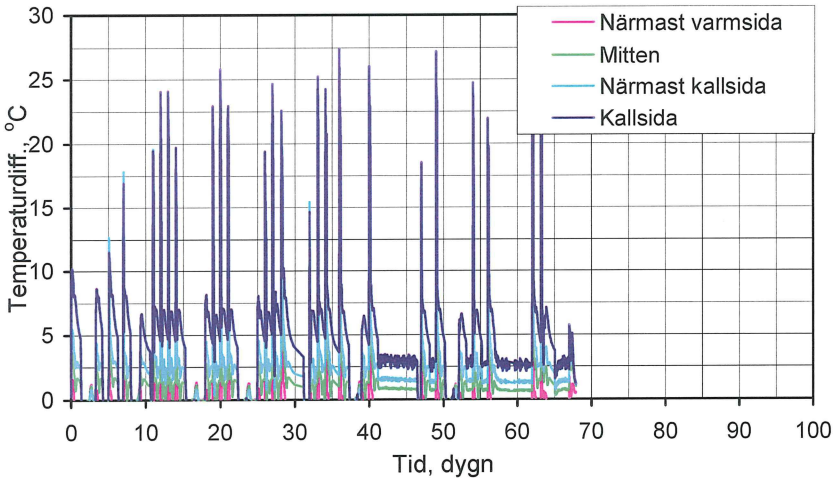
(BI-b)



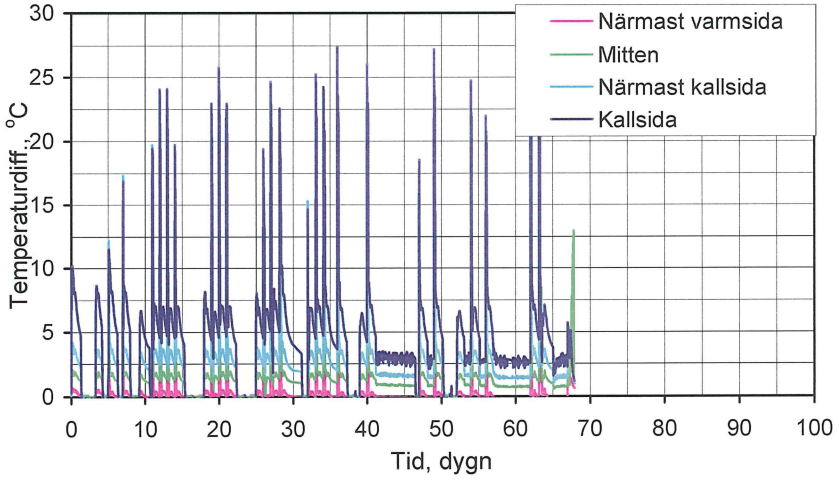
(BI-c)

Belastade icke förstärkta balkar, vct = 0.70.

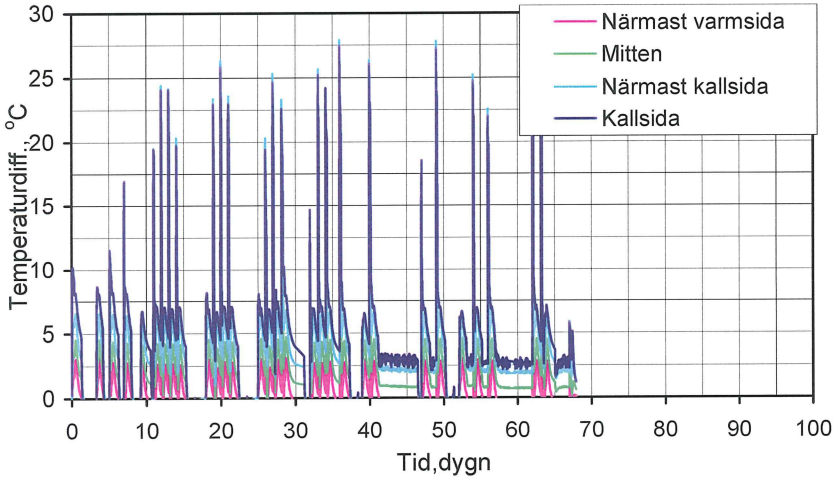
(BI-a) Vattenlagrad med tillgång till vatten på den varma sidan.
(BI-b) Vattenlagrad utan tillgång till vatten.
(BI-c) Torr.



(BI-d)



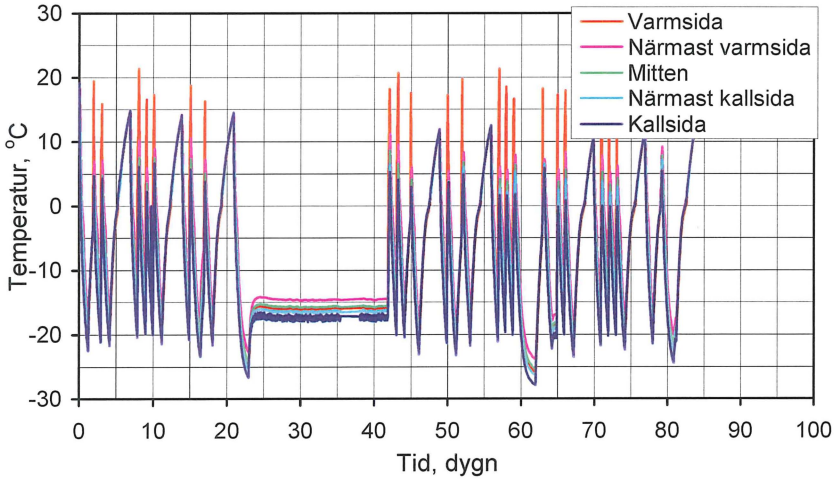
(BI-e)



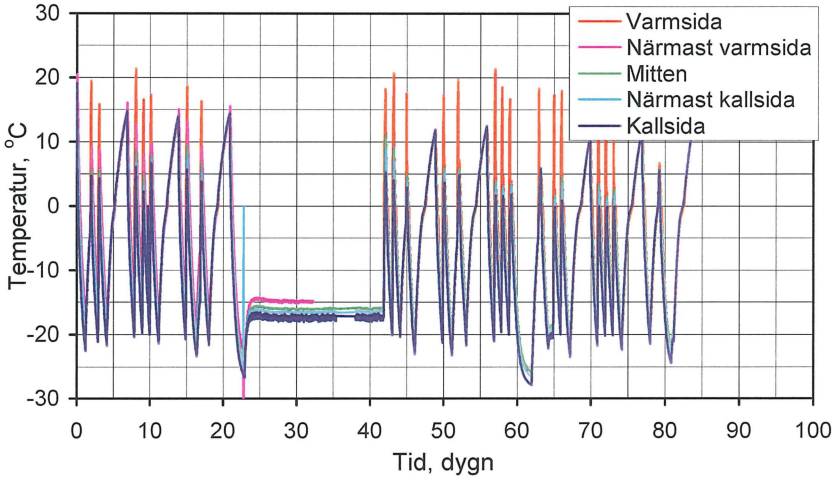
(BI-f)

Belastade icke förstärkta balkar, vct = 0.70.

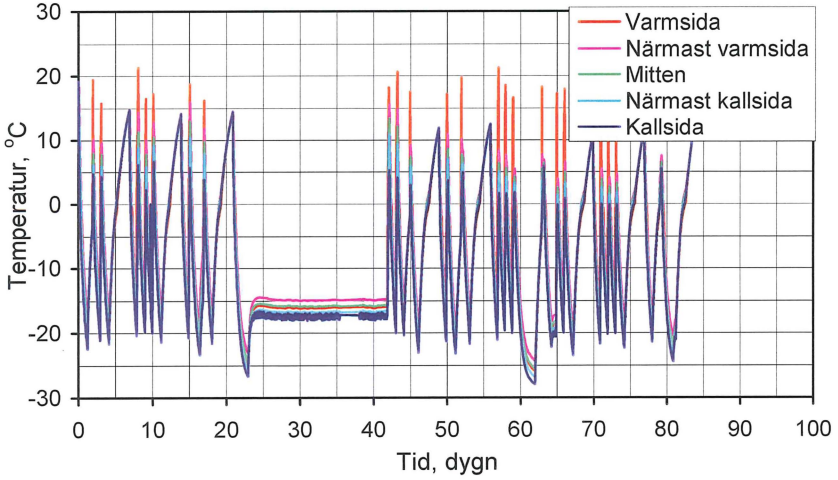
(BI-d) Vattenlagrad med tillgång till vatten på den varma sidan.
(BI-e) Vattenlagrad utan tillgång till vatten.
(BI-f) Torr.



(BF-a)



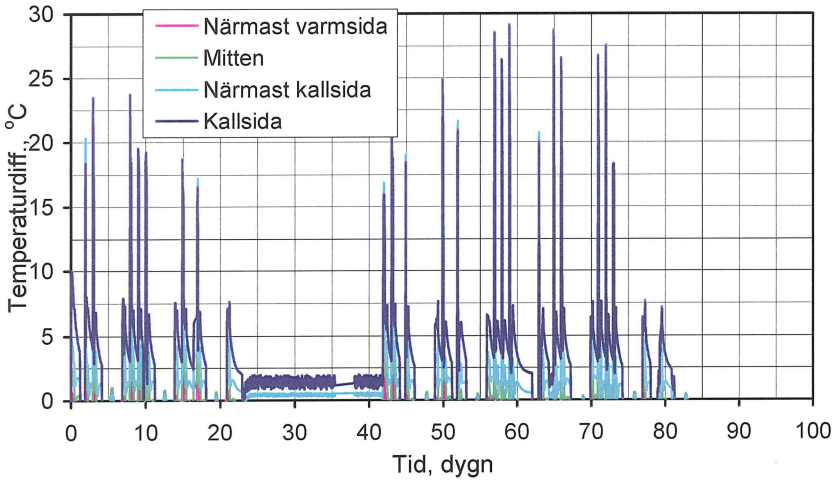
(BF-b)



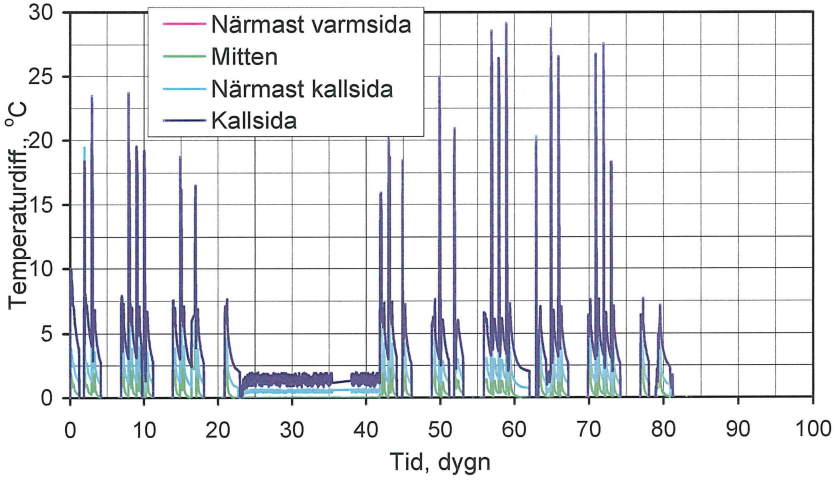
(BF-c)

Belastade förstärkta balkar, vct = 0.70.

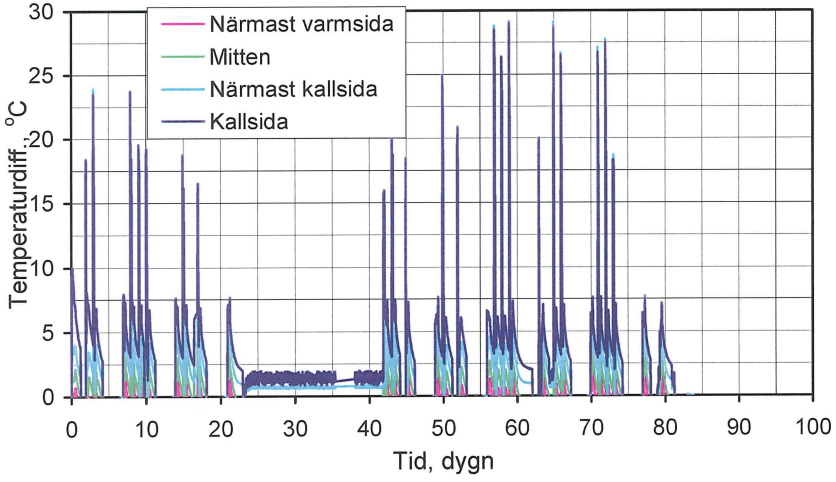
(BF-a) Vattenlagrad med tillgång till vatten på den varma sidan.
(BF-b) Vattenlagrad utan tillgång till vatten.
(BF-c) Torr.



(BF-d)



(BF-e)



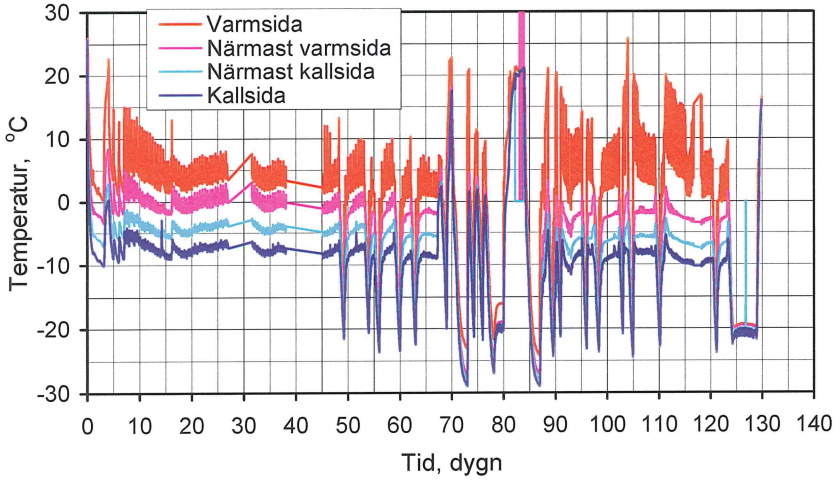
(BF-f)

Belastade förstärkta balkar, vct = 0.70.

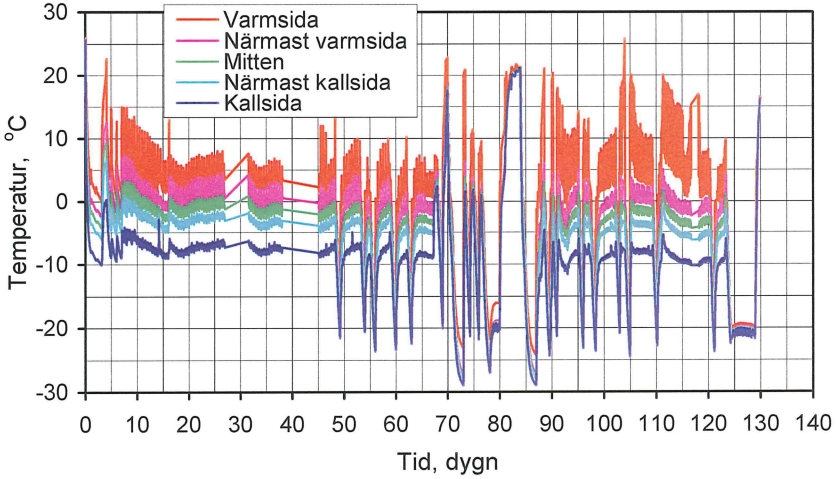
(BF-d) Vattenlagrad med tillgång till vatten på den varma sidan.

(BF-e) Vattenlagrad utan tillgång till vatten.

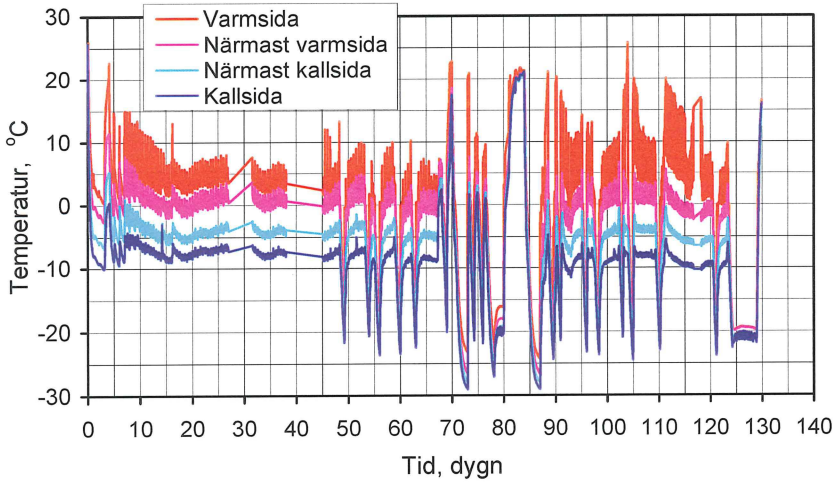
(BF-f) Torr.



(EIF-a)



(EIF-b)



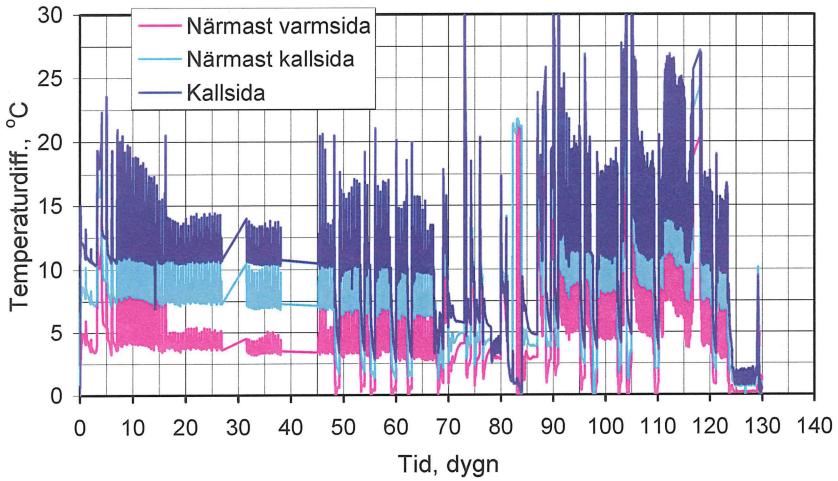
(EIF-c)

Icke belastade förstärkta balkar, vct = 0.70, extra serie.

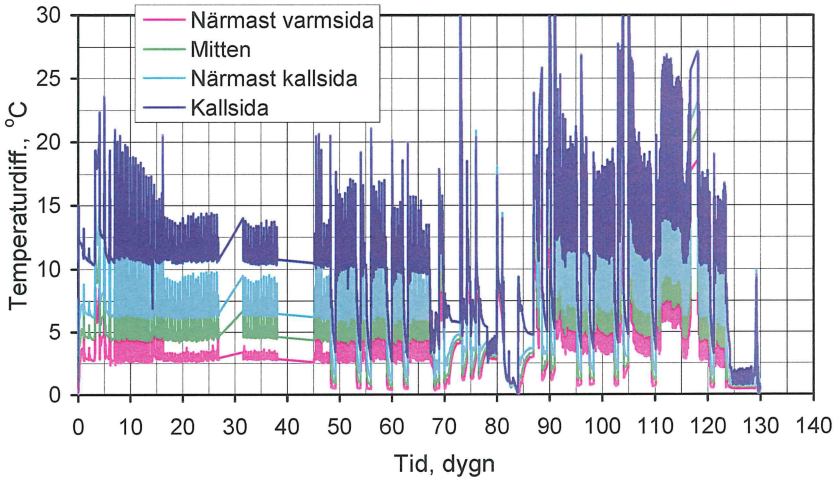
(EIF-a) Vattenlagrad med tillgång till vatten på den varma sidan.

(EIF-b) Vattenlagrad utan tillgång till vatten.

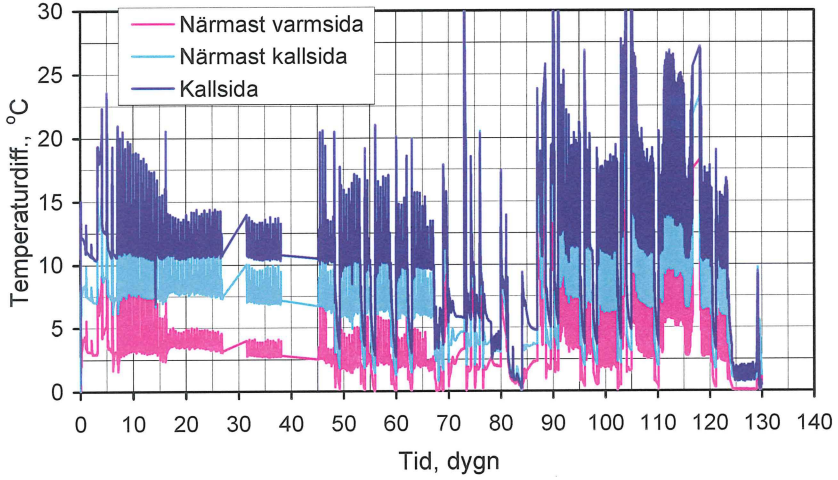
(EIF-c) Torr.



(EIF-d)



(EIF-e)



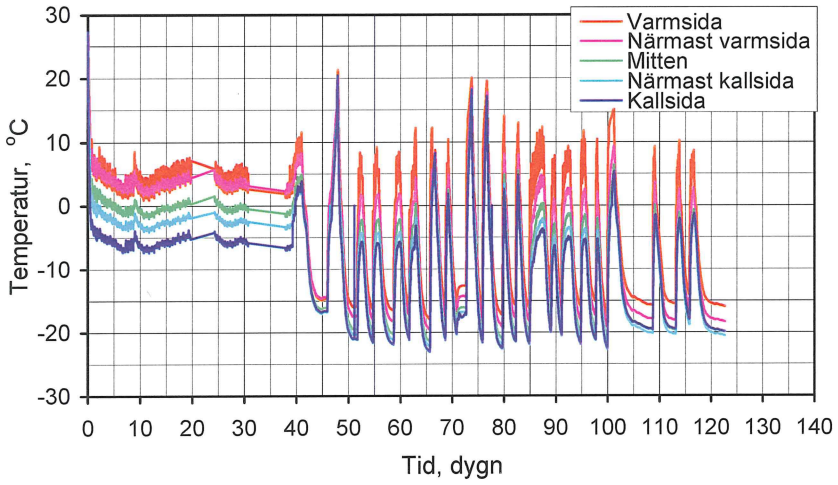
(EIF-f)

Icke belastade förstärkta balkar, vct = 0.70, extra serie.

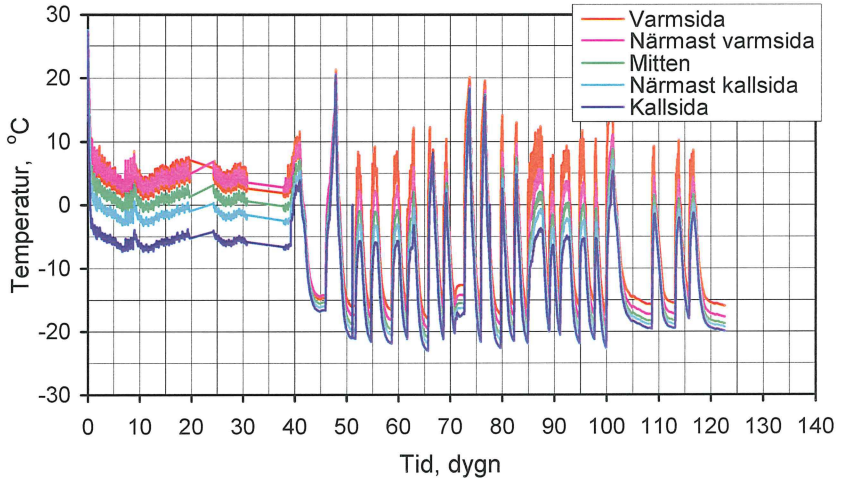
(EIF-d) Vattenlagrad med tillgång till vatten på den varma sidan.

(EIF-e) Vattenlagrad utan tillgång till vatten.

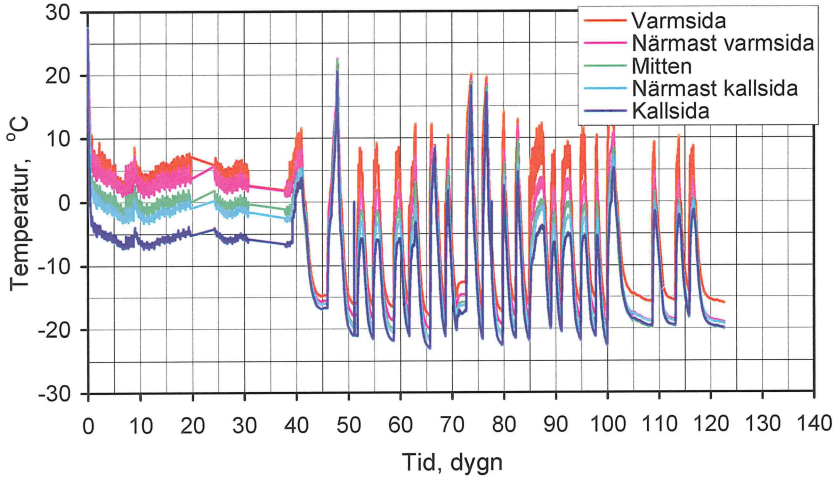
(EIF-f) Torr.



(EBF-a)



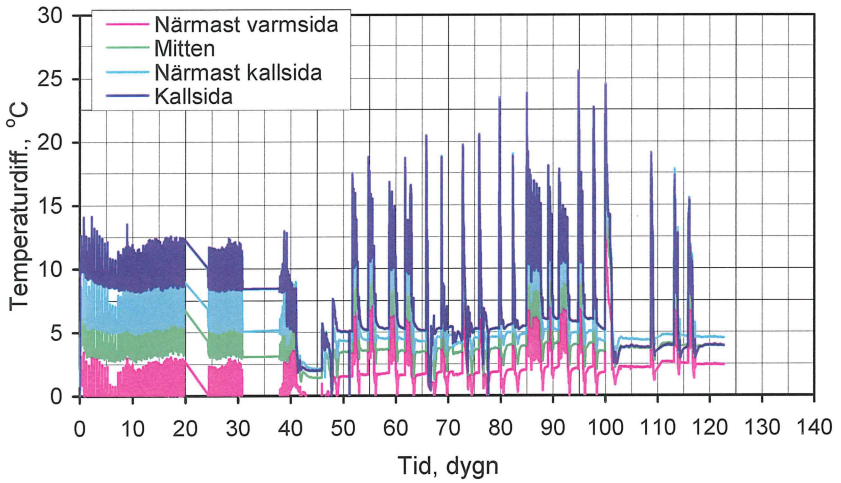
(EBF-b)



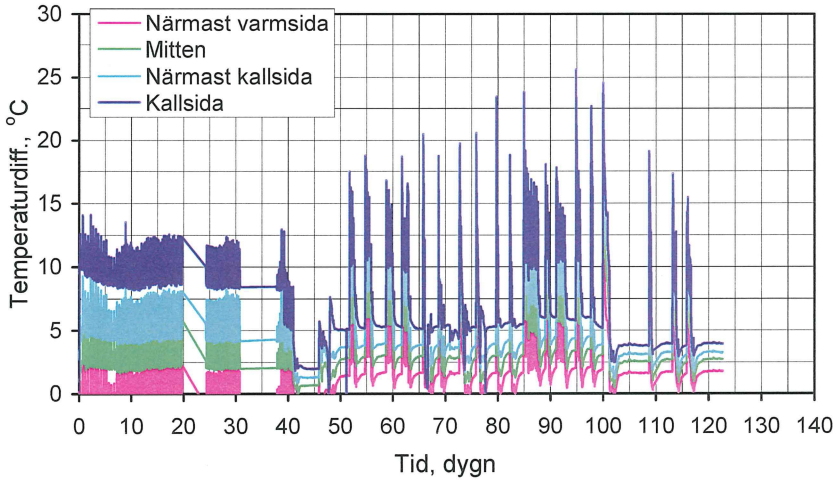
(EBF-c)

Belastade förstärkta balkar, vct = 0.70, extra serie.

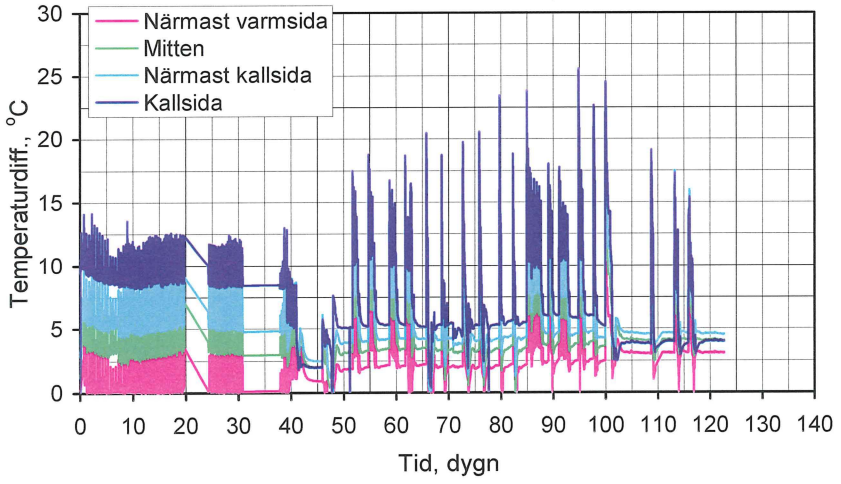
(EBF-a) Vattenlagrad med tillgång till vatten på den varma sidan.
(EBF-b) Vattenlagrad utan tillgång till vatten.
(EBF-c) Torr.



(EBF-d)



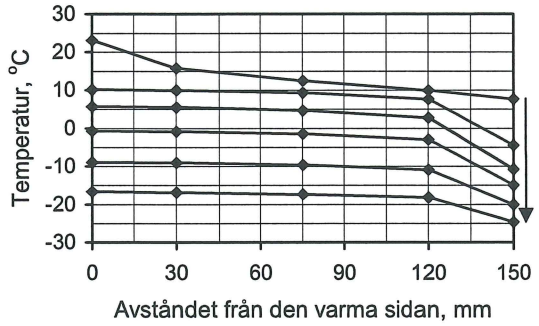
(EBF-e)



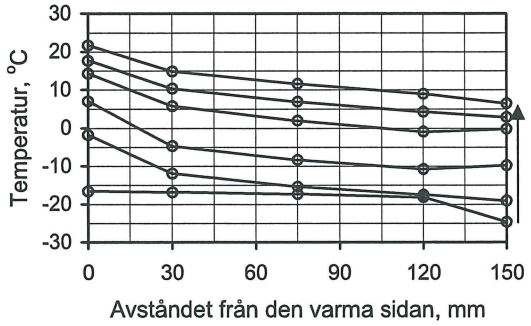
(EBF-f)

Belastade förstärkta balkar, vct = 0.70, extra serie.

(EBF-d) Vattenlagrad med tillgång till vatten på den varma sidan.
(EBF-e) Vattenlagrad utan tillgång till vatten.
(EBF-f) Torr.

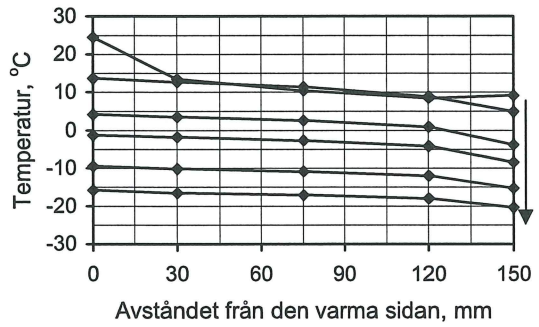


(Frysning)

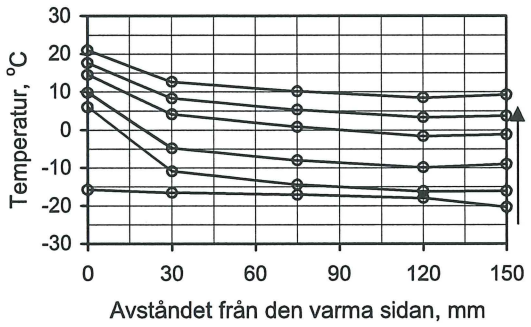


(Upptining)

Obelastad icke förstärkt balk.

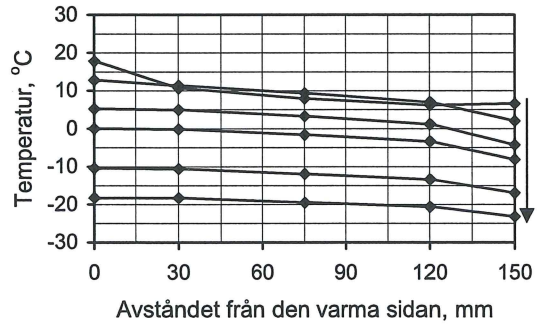


(Frysning)

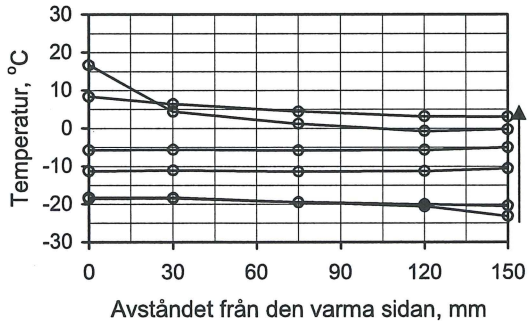


(Upptining)

Obelastad förstärkt balk.



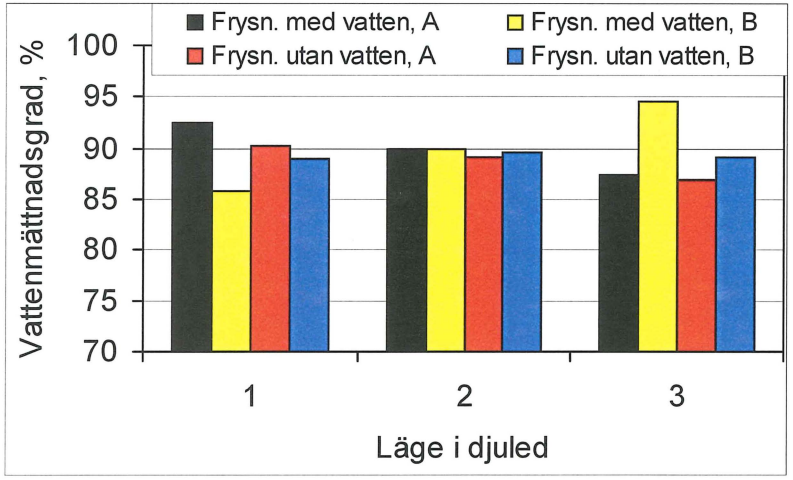
(Frysning)



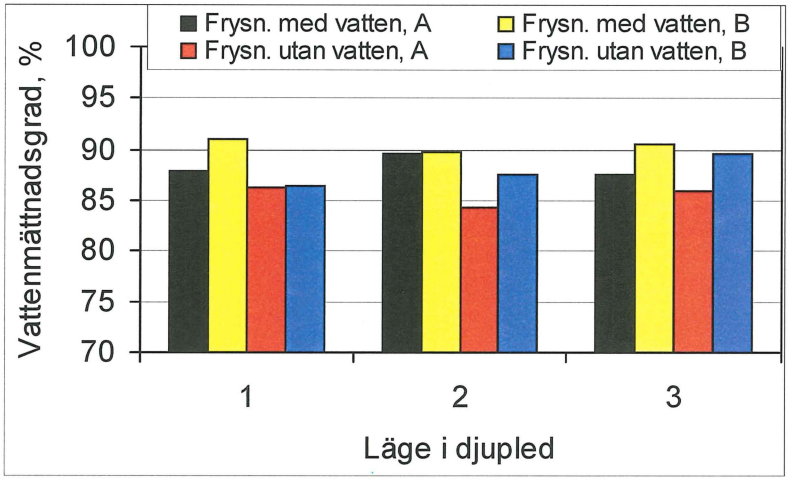
(Upptining)

Belastad icke förstärkt balk.

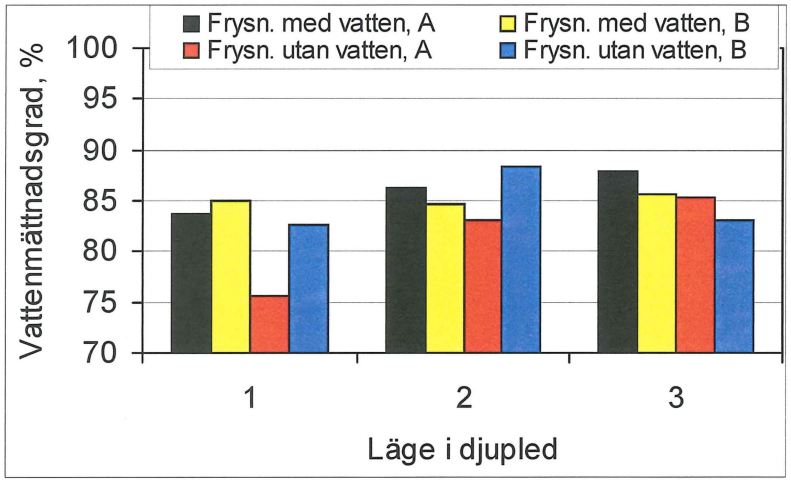
BELASTNINGSUTRUSTNING



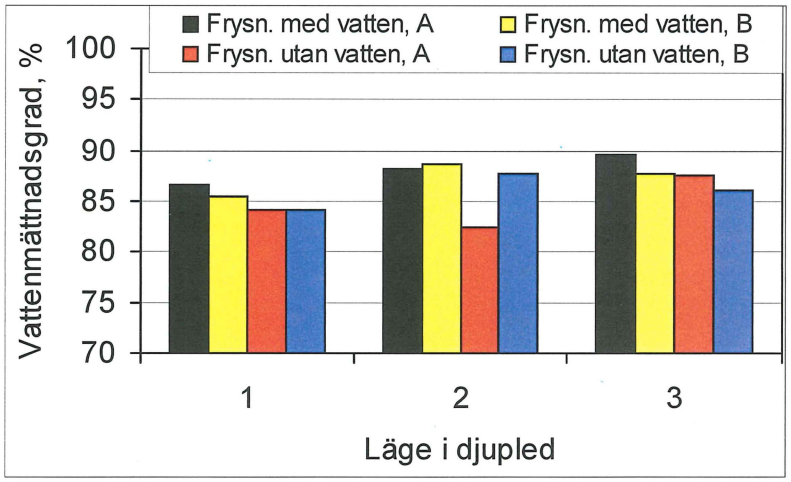
(a) vct = 0.70, icke förstärkt, obelastad.



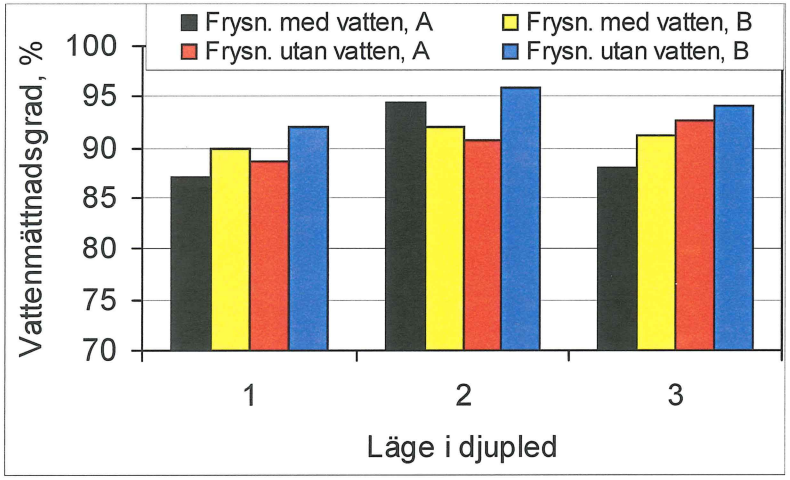
(b) vct = 0.70, förstärkt, obelastad.



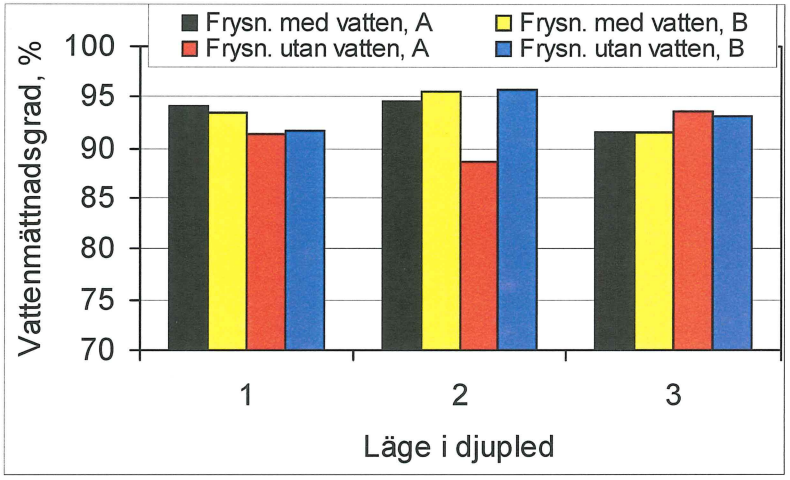
(c) vct = 0.70, icke förstärkt, belastad till 70% av 28 dygnsbrottlast.



(d) vct = 0.70, icke förstärkt, belastad till 70% av 28 dygnsbrottlast.



(a) vct = 0.70, förstärkt, obelastad, extra serie.



(b) vct = 0.70, förstärkt, belastad till 70% av 28 dygnsbrottlast, extra serie.

LUNDS TEKNISKA
HÖGSKOLA
Lunds universitet