Bijlage A. Maple programma

De oplossing van de differentiale vergelijkingen van de vijf belastinggevallen.

1. Verticale puntlast:

```
> restart:
>deq1:=EI*diff(w1(x),x,x,x,x)=0:deq2:=EI*diff(w2(x),x,x,x,x)
=0:
> ans1:=dsolve(deq1):
> ans2:=dsolve(deq2):
> ans1:=eval(rhs(ans1),{_C1=C11,_C2=C21,_C3=C31,_C4=C41}):
> ans2:=eval(rhs(ans2),{_C1=C12,_C2=C22,_C3=C32,_C4=C42}):
> rc1:=eval(ans1,x=0)=0:
> rc2:=eval(diff(ans1,x),x=0)=0:
> rc3:=eval(ans2,x=L)=0:
> rc4:=eval(diff(ans2,x),x=L)=0:
> rc5:=eval(ans1,x=L*beta)=eval(ans2,x=L*beta):
>
rc6:=eval(diff(ans1,x),x=L*beta)=eval(diff(ans2,x),x=L*beta
):
>rc7:=eval(diff(ans1,x,x),x=L*beta)=eval(diff(ans2,x,x),x=L*
beta):
>
rc8:=eval(diff(ans1,x,x,x),x=0)=eval(diff(ans2,x,x,x),x=L)-
F:
>cons:=solve({rc1,rc2,rc3,rc4,rc5,rc6,rc7,rc8},{C11,C21,C31,
C41,C12,C22,C32,C42}):
> W[l]:=eval(ans1,cons)/EI:W[r]:=eval(ans2,cons)/EI:
> Phi[l]:=-diff(W[l],x):Phi[r]:=-diff(W[r],x):
> M[l]:=factor(-EI*diff(W[l],x,x));
M[r]:=factor(EI*diff(W[r],x,x));
```

$$M_l := F (\beta - 1)^2 (2\,\beta\, x - L\,\beta + x)$$

$$M_r := F \beta^2 (2\,\beta\, x - L\,\beta - 3\, x + 2\, L)$$

```
> Q[l]:=factor(-EI*diff(W[l],x,x,x));
> Q[r]:=factor(-EI*diff(W[r],x,x,x));
```

$$Q_l := F (2\,\beta + 1) (\beta - 1)^2$$

$$Q_r := F \beta^2 (-3 + 2\,\beta)$$

2. Verticale verdeelde belasting:

```
> restart:
>deq(1):=EI*diff(W1(x),x,x,x,x)=0:
deq(2):=EI*diff(W2(x),x,x,x,x)=(qb-qe)*(gamma*L-x)/((gamma-beta)*L)+qe:
deq(3):=EI*diff(W3(x),x,x,x,x)=0:
> ans1:=dsolve(deq(1)):
> ans2:=dsolve(deq(2)):
> ans3:=dsolve(deq(3)):
> ans1:=eval(rhs(ans1),{_C1=C11,_C2=C21,_C3=C31,_C4=C41}):
> ans2:=eval(rhs(ans2),{_C1=C12,_C2=C22,_C3=C32,_C4=C42}):
> ans3:=eval(rhs(ans3),{_C1=C13,_C2=C23,_C3=C33,_C4=C43}):
> rc1:=eval(ans1,x=0)=0:
> rc2:=eval(diff(ans1,x),x=0)=0:
> rc3:=eval(ans3,x=L):
> rc4:=eval(diff(ans3,x),x=L):
> rc5:=eval(ans1,x=beta*L)=eval(ans2,x=beta*L):
>rc6:=eval(diff(ans1,x),x=beta*L)=eval(diff(ans2,x),x=beta*L):
>rc7:=eval(diff(ans1,x,x),x=beta*L)=eval(diff(ans2,x,x),x=beta*L):
>rc8:=eval(diff(ans1,x,x,x),x=beta*L)=eval(diff(ans2,x,x,x),x=beta*L):
> rc9:=eval(ans2,x=gamma*L)=eval(ans3,x=gamma*L):
>rc10:=eval(diff(ans2,x),x=gamma*L)=eval(diff(ans3,x),x=gamma*L):
>rc11:=eval(diff(ans2,x,x),x=gamma*L)=eval(diff(ans3,x,x),x=gamma*L):
>rc12:=eval(diff(ans2,x,x,x),x=gamma*L)=eval(diff(ans3,x,x,x),x=gamma*L):
>
cons:=solve({rc1,rc2,rc3,rc4,rc5,rc6,rc7,rc8,rc9,rc10,rc11,rc12},{C11,C21,C31,C41,C12,C22,C32,C42,C13,C23,C33,C43}):
> W[1]:=factor(eval(ans1,cons)):
> W[2]:=factor(eval(ans2,cons)):
W[3]:=factor(eval(ans3,cons)):
>phi[1]:=eval(diff(W[1],x)):phi[2]:=eval(diff(W[2],x)):phi[3]:=eval(diff(W[3],x)):
> M[1]:=factor(eval(diff(W[1],x,x))*(-EI));
M[2]:=factor(eval(diff(W[2],x,x))*(-EI));
M[3]:=factor(eval(diff(W[3],x,x))*(-EI));
```

$$M_1 := -\frac{1}{60} L(-\gamma+\beta)(30\gamma^2 L qe - 9 L \beta^2 qb \gamma - 6\beta^2 \gamma qe L - 6\beta L qb \gamma^2 - 9\gamma^2 L qe \beta + 18 x \beta^2 \gamma qb + 12 x \beta^2 \gamma qe + 12 x \beta \gamma^2 qb + 18 x \beta \gamma^2 qe + 30 L \beta^2 qb + 10 L \beta^2 qe + 20 L \beta qb \gamma$$

$$+20\,\gamma\,L\,qe\,\beta+10\,\gamma^{2}\,L\,qb+30\,qe\,x-30\,\beta\,x\,\gamma\,qe-30\,\beta\,x\,\gamma\,qb+24\,x\,\beta^{3}\,qb+6\,x\,\beta^{3}\,qe$$

$$+24\,x\,\gamma^{3}\,qe+6\,x\,\gamma^{3}\,qb-10\,\beta\,qe\,L-20\,qb\,L\,\beta-45\,qb\,\beta^{2}\,x-15\,qe\,\beta^{2}\,x+30\,qb\,x-10\,L\,qb\,\gamma$$

$$-20\,\gamma\,L\,qe-15\,x\,\gamma^{2}\,qb-45\,x\,\gamma^{2}\,qe-12\,\gamma^{3}\,L\,qe-12\,L\,\beta^{3}\,qb-3\,L\,\beta^{3}\,qe-3\,\gamma^{3}\,L\,qb)$$

$$M_2 := \frac{1}{60\,L\,(-\gamma+\beta)}(10\,qb\,\gamma^{3}\,L^{3}-30\,\gamma^{4}\,L^{3}\,qe+20\,qe\,\gamma^{3}\,L^{3}+30\,qb\,\gamma\,L\,x^{2}-30\,qe\,L\,\beta\,x^{2}-10\,qb\,x^{3}$$

$$+10\,qe\,x^{3}-30\,qe\,L^{3}\,\beta\,\gamma^{2}-30\,L^{3}\,\beta^{4}\,qb-10\,L^{3}\,\beta^{4}\,qe+40\,L^{3}\,\beta^{3}\,qb\,\gamma+40\,\gamma^{3}\,L^{3}\,qe\,\beta$$

$$-10\,\gamma^{4}\,L^{3}\,qb-30\,L^{2}\,x\,\gamma^{2}\,qe+15\,L^{2}\,x\,\gamma^{4}\,qb+45\,L^{2}\,x\,\gamma^{4}\,qe-6\,L^{2}\,x\,\gamma^{5}\,qb-24\,L^{2}\,x\,\gamma^{5}\,qe$$

$$+3\,L^{3}\,\gamma^{5}\,qb+12\,L^{3}\,\gamma^{5}\,qe-30\,L^{2}\,x\,\gamma^{2}\,qb+45\,L^{2}\,x\,\beta^{4}\,qb+15\,L^{2}\,x\,\beta^{4}\,qe-24\,L^{2}\,x\,\beta^{5}\,qb$$

$$-6\,L^{2}\,x\,\beta^{5}\,qe+12\,L^{3}\,\beta^{5}\,qb+3\,L^{3}\,\beta^{5}\,qe+60\,L^{2}\,x\,\gamma\,qe\,\beta-15\,L^{3}\,\gamma\,\beta^{4}\,qb+30\,L^{2}\,x\,\gamma\,\beta^{4}\,qb$$

$$+30\,L^{2}\,x\,\gamma^{4}\,\beta\,qe-60\,L^{2}\,x\,\gamma\,\beta^{3}\,qb-60\,L^{2}\,x\,\gamma^{3}\,qe\,\beta-15\,L^{3}\,\gamma^{4}\,\beta\,qe)$$

$$M_3 := -\frac{1}{60}L\,(-\gamma+\beta)\,(30\,\gamma^{2}\,L\,qe-9\,L\,\beta^{2}\,qb\,\gamma-6\,\beta^{2}\,\gamma\,qe\,L-6\,\beta\,L\,qb\,\gamma^{2}-9\,\gamma^{2}\,L\,qe\,\beta+18\,x\,\beta^{2}\,\gamma\,qb$$

$$+12\,x\,\beta^{2}\,\gamma\,qe+12\,x\,\beta\,\gamma^{2}\,qb+18\,x\,\beta\,\gamma^{2}\,qe+30\,L\,\beta^{2}\,qb+10\,L\,\beta^{2}\,qe+20\,L\,\beta\,qb\,\gamma$$

$$+20\,\gamma\,L\,qe\,\beta+10\,\gamma^{2}\,L\,qb-30\,\beta\,x\,\gamma\,qe-30\,\beta\,x\,\gamma\,qb+24\,x\,\beta^{3}\,qb+6\,x\,\beta^{3}\,qe+24\,x\,\gamma^{3}\,qe$$

$$+6\,x\,\gamma^{3}\,qb-45\,qb\,\beta^{2}\,x-15\,qe\,\beta^{2}\,x-15\,x\,\gamma^{2}\,qb-45\,x\,\gamma^{2}\,qe-12\,\gamma^{3}\,L\,qe-12\,L\,\beta^{3}\,qb-3\,L\,\beta^{3}\,qe$$

$$-3\,\gamma^{3}\,L\,qb)$$

```
> Q[1]:=factor(eval(diff(W[1],x,x,x))*(-EI));
> Q[2]:=factor(eval(diff(W[2],x,x,x))*(-EI));
> Q[3]:=factor(eval(diff(W[3],x,x,x))*(-EI));
```

$$Q_1 := -\frac{1}{20}L\,(-\gamma+\beta)\,(6\,\beta^{2}\,\gamma\,qb+4\,\beta^{2}\,\gamma\,qe+4\,\beta\,\gamma^{2}\,qb+6\,\beta\,\gamma^{2}\,qe+10\,qe-10\,\gamma\,qe\,\beta-10\,\beta\,\gamma\,qb$$

$$+8\,\beta^{3}\,qb+2\,\beta^{3}\,qe+8\,\gamma^{3}\,qe+2\,\gamma^{3}\,qb-15\,\beta^{2}\,qb-5\,\beta^{2}\,qe+10\,qb-5\,\gamma^{2}\,qb-15\,\gamma^{2}\,qe)$$

$$Q_2 := \frac{1}{20\,L\,(-\gamma+\beta)}(20\,qb\,\gamma\,L\,x - 20\,qe\,L\,\beta\,x - 10\,qb\,x^2 + 10\,qe\,x^2 - 10\,qe\,\gamma^2\,L^2 + 5\,\gamma^4\,L^2\,qb$$
$$+ 15\,\gamma^4\,L^2\,qe - 2\,\gamma^5\,L^2\,qb - 8\,\gamma^5\,L^2\,qe - 10\,qb\,\gamma^2\,L^2 + 15\,L^2\,\beta^4\,qb + 5\,L^2\,\beta^4\,qe - 8\,L^2\,\beta^5\,qb$$
$$- 2\,L^2\,\beta^5\,qe + 20\,qe\,L^2\,\beta\,\gamma + 10\,L^2\,\beta^4\,qb\,\gamma + 10\,\gamma^4\,L^2\,qe\,\beta - 20\,L^2\,\beta^3\,qb\,\gamma - 20\,\gamma^3\,L^2\,qe\,\beta)$$
$$Q_3 := -\frac{1}{20}L\,(-\gamma+\beta)\,(8\,\beta^3\,qb + 2\,\beta^3\,qe - 15\,\beta^2\,qb - 5\,\beta^2\,qe + 6\,\beta^2\,\gamma\,qb + 4\,\beta^2\,\gamma\,qe - 10\,\beta\,\gamma\,qb$$
$$- 10\,\gamma\,qe\,\beta + 4\,\beta\,\gamma^2\,qb + 6\,\beta\,\gamma^2\,qe - 5\,\gamma^2\,qb - 15\,\gamma^2\,qe + 2\,\gamma^3\,qb + 8\,\gamma^3\,qe)$$

3. Horizontale puntlast:

```
>  restart:
> deq1:=EA*diff(U1(x),x,x)=0:deq2:=EA*diff(U2(x),x,x)=0:
> ans1:=dsolve(deq1):
> ans2:=dsolve(deq2):
> ans1:=eval(rhs(ans1),{_C1=C11,_C2=C21}):
> ans2:=eval(rhs(ans2),{_C1=C12,_C2=C22}):
> rc1:=eval(ans1,x=0)=0:
> rc2:=eval(ans2,x=L)=0:
> rc3:=eval(ans1,x=beta*L)=eval(ans2,x=beta*L):
>rc4:=eval(diff(ans1,x),x=beta*L)=eval(diff(ans2,x),x=beta*
L)+F:
> cons:=solve({rc1,rc2,rc3,rc4},{C11,C21,C12,C22}):
> U[1]:=factor(eval(ans1,cons)):
U[2]:=factor(eval(ans2,cons)):
> N[1]:=factor(eval(diff(U[1],x)));
```

$$N_1 := -F\,(\beta - 1)$$

```
> N[2]:=factor(eval(diff(U[2],x)));
```

$$N_2 := -\beta\,F$$

4. Horizontale verdeelde belasting:

```
> restart:
> deq1:=EA*diff(U1(x),x,x)=0:
deq2:=EA*diff(U2(x),x,x)=-(qb-qe)*(gamma*L-x)/((gamma-
beta)*L)-qe:
deq3:=EA*diff(U3(x),x,x)=0:
> ans1:=dsolve(deq1):
> ans2:=dsolve(deq2):
```

```
> ans3:=dsolve(deq3):
> ans1:=eval(rhs(ans1),{_C1=C11,_C2=C21}):
> ans2:=eval(rhs(ans2),{_C1=C12,_C2=C22}):
> ans3:=eval(rhs(ans3),{_C1=C13,_C2=C23}):
> rc1:=eval(ans1,x=0)=0:
> rc2:=eval(ans3,x=L)=0:
> rc3:=eval(ans1,x=beta*L)=eval(ans2,x=beta*L):
> rc4:=eval(ans2,x=gamma*L)=eval(ans3,x=gamma*L):
>rc5:=eval(diff(ans1,x),x=beta*L)=eval(diff(ans2,x),x=beta*
L):
>rc6:=eval(diff(ans2,x),x=gamma*L)=eval(diff(ans3,x),x=gamm
a*L):
>cons:=solve({rc1,rc2,rc3,rc4,rc5,rc6},{C11,C21,C12,C22,C13
,C23}):
> U[1]:=factor(eval(ans1,cons)):
> U[2]:=factor(eval(ans2,cons)):
> U[3]:=factor(eval(ans3,cons)):
> N[1]:=factor(EA*eval(diff(U[1],x)));
```

$$N_1 := \frac{1}{6}(-\gamma+\beta)\,(2\,qb\,\beta+qe\,\beta-3\,qe+qb\,\gamma-3\,qb+2\,qe\,\gamma)\,L$$

```
> N[2]:=factor(EA*eval(diff(U[2],x)));
```

$$N_2 := -\frac{1}{6\,(-\gamma+\beta)\,L}(-6\,qb\,\gamma\,L\,x+3\,qb\,x^2-3\,qe\,x^2+6\,qe\,L\,\beta\,x+3\,qb\,\gamma^2\,L^2+3\,qe\,\gamma^2\,L^2-6\,qe\,L^2\,\beta\,\gamma$$
$$+3\,L^2\,\beta^2\,qb\,\gamma+3\,\gamma^2\,L^2\,qe\,\beta-2\,\gamma^3\,L^2\,qe-\gamma^3\,L^2\,qb-2\,L^2\,\beta^3\,qb-L^2\,\beta^3\,qe)$$

```
> N[3]:=factor(EA*eval(diff(U[3],x)));
```

$$N_3 := \frac{1}{6}L\,(-\gamma+\beta)\,(2\,qb\,\beta+qe\,\beta+qb\,\gamma+2\,qe\,\gamma)$$

5. Geconcerteerde momentlast:

```
> Restart:
>deq1:=EI*diff(w1(x),x,x,x,x)=0:deq2:=EI*diff(w2(x),x,x,x,x)
=0:
> ans1:=dsolve(deq1):
> ans2:=dsolve(deq2):
> ans1:=eval(rhs(ans1),{_C1=C11,_C2=C21,_C3=C31,_C4=C41}):
> ans2:=eval(rhs(ans2),{_C1=C12,_C2=C22,_C3=C32,_C4=C42}):
> rc1:=eval(ans1,x=0)=0:
> rc2:=eval(diff(ans1,x),x=0)=0:
> rc3:=eval(ans2,x=L)=0:
> rc4:=eval(diff(ans2,x),x=L)=0:
```

```
> rc5:=eval(ans1,x=L*beta)=eval(ans2,x=L*beta):
>
rc6:=eval(diff(ans1,x),x=L*beta)=eval(diff(ans2,x),x=L*beta
):
>rc7:=eval(diff(ans1,x,x),x=L*beta)=eval(diff(ans2,x,x),x=L*
beta)-T:
>rc8:=eval(diff(ans1,x,x,x),x=L*beta)=eval(diff(ans2,x,x,x),
x=L*beta):
>cons:=solve({rc1,rc2,rc3,rc4,rc5,rc6,rc7,rc8},{C11,C21,C31,
C41,C12,C22,C32,C42}):
> W[l]:=eval(ans1,cons)/EI:W[r]:=eval(ans2,cons)/EI:
> Phi[l]:=-diff(W[l],x):Phi[r]:=-diff(W[r],x):
> M[l]:=factor(-EI*diff(W[l],x,x));
M[r]:=factor(-EI*diff(W[r],x,x));
```

$$M_l := -\frac{T(-1+\beta)(6\beta x - 3L\beta + L)}{L}$$

$$M_r := -\frac{T\beta(-6x+6\beta x+4L-3L\beta)}{L}$$

```
➢ Q[l]:=factor(-EI*diff(W[l],x,x,x));
➢ Q[r]:=factor(-EI*diff(W[r],x,x,x));
```

$$Q_l := -\frac{6T\beta(-1+\beta)}{L}$$

$$Q_r := -\frac{6T\beta(-1+\beta)}{L}$$

Bijlage B. Rekenprogramma

```
dv=3; % Graad van vrijheid
ne=5; % Aantal elementen
nn=6; % Aantal knopen
% Knoop coördinaten: knoopnummer x z
kcr=[1 0 0;2 0 -4;3 4 -4;4 4 0;5 8 -4;6 8 0];
% Element gegevens: element begin end E A I
elm=[1 1 2 1 1 1;2 2 3 1 1 1;3 3 4 1 1 1;4 3 5 1 1 1;5 5 6 1 1 1];
%
% Vrijheidsgraden
U=[0 0 0 1 1 1 1 1 1 0 0 0 1 1 1 0 0 1]';
% Verticale Puntlasten: Puntlastnummer, element nummer, Afstand tot beging element, grootte
Fv_load=[1 4 1 5;2 4 3 5];
% Horizontale Puntlasten: Puntlastnummer, element nummer, Afstand tot beging element, grootte
Fh_load=[1 2 0 3];
% Verticale Verdeelde lasten: Lastnummer, element nummer, Afstand tot beging, Afstand tot eind, Grootte begin, Grootte eind
Qv_load=[1 2 0 4 2 2];
% Horizontale Verdeelde lasten: Lastnummer, element nummer, Afstand tot beging, Afstand tot eind, Grootte begin, Grootte eind
Qh_load=[1 1 1 1 0 0];
% Momenten: Momentnummer, element nummer, Afstand tot beging element, grootte
M_load=[1 2 1 0];
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Lengte/hoek van elke element [L , alfa]
La=zeros(ne,2);
for n = 1:ne
  xb=kcr(elm(n,2),2);
  xe=kcr(elm(n,3),2);
  zb=kcr(elm(n,2),3);
  ze=kcr(elm(n,3),3);
  La(n,1) = sqrt((xe-xb)^2+(ze-zb)^2);
  if (ze<=zb)
     if (xe>=xb)
        La(n,2) = atan((zb-ze)/(xe-xb));
     else
        La(n,2) = atan((zb-ze)/(xe-xb))+pi;
     end
  else
```

```
      if (xe>=xb)
         La(n,2) = 2*pi+atan((zb-ze)/(xe-xb));
      else
         La(n,2) = pi+atan((zb-ze)/(xe-xb));
      end
   end
end
%
% Belastingsgevallen:
%
[rFv,cFv]=size(Fv_load);
[rFh,cFh]=size(Fh_load);
[rQv,cQv]=size(Qv_load);
[rQh,cQh]=size(Qh_load);
[rM,cM]=size(M_load);
%
% Puntlasten
%
% 1-Verticale puntlasten:
%
f1=zeros(rFv,10);
for n = 1:rFv
    eln_Fv=Fv_load(n,2);
    for n1=1:ne
        if (elm(n1,1)==eln_Fv)
            s_eln_Fv=n1;
            b_eln_Fv=elm(n1,2);
            e_eln_Fv=elm(n1,3);
        end
    end
    beta=Fv_load(n,3)/La(s_eln_Fv,1);
    Fv_left=Fv_load(n,4)*(2*beta+1)*(beta-1)^2;
    Fv_right=-Fv_load(n,4)*beta^2*(-3+2*beta);
    Mv_left=-Fv_load(n,4)*La(s_eln_Fv,1)*beta*(beta-1)^2;
    Mv_right=-Fv_load(n,4)*La(s_eln_Fv,1)*beta^2*(beta-1);
    Fhv_left=0;
    Fhv_right=0;
    f1(n,:)=[s_eln_Fv b_eln_Fv e_eln_Fv La(s_eln_Fv,2) Fhv_left Fv_left Mv_left
Fhv_right Fv_right Mv_right];
end
f1=f1;
%
% 2-Horizontale puntlasten:
%
f2=zeros(rFh,10);
for n = 1:rFh
```

```
   eln_Fh=Fh_load(n,2);
       for n1=1:ne
           if (elm(n1,1)==eln_Fh);
               s_eln_Fh=n1;
               b_eln_Fh=elm(n1,2);
               e_eln_Fh=elm(n1,3);
           end
       end
   beta=Fh_load(n,3)/La(s_eln_Fh,1);
   Fvh_left=0;
   Fvh_righ=0;
   Mh_left=0;
   Mh_right=0;
   Fh_left=Fh_load(n,4)*(1-beta);
   Fh_right=Fh_load(n,4)*beta;
   f2(n,:)=[s_eln_Fh b_eln_Fh e_eln_Fh La(s_eln_Fh,2) Fh_left Fvh_left Mh_left
Fh_right Fvh_righ Mh_right];
end
f2=f2;
%
% Verdeelde belasting
%
% 1-Verdeelde verticale belasting:
%
f3=zeros(rQv,10);
for n = 1:rQv
   eln_Qv=Qv_load(n,2);
   for n1=1:ne
       if (elm(n1,1)==eln_Qv)
           s_eln_Qv=n1;
           b_eln_Qv=elm(n1,2);
           e_eln_Qv=elm(n1,3);
      end
   end
   qb=Qv_load(n,5);
   qe=Qv_load(n,6);
   beta=Qv_load(n,3)/La(s_eln_Qv,1);
   gamma=Qv_load(n,4)/La(s_eln_Qv,1);
   Qhv_left=0;
   Qhv_right=0;
   Qv_left=-1/20*La(s_eln_Qv,1)*(-
gamma+beta)*(6*beta^2*gamma*qb+4*beta^2*gamma*qe+4*beta*gamma^2*qb+
6*beta*gamma^2*qe+10*qe-10*gamma*qe*beta-
10*beta*gamma*qb+8*beta^3*qb+2*beta^3*qe+8*gamma^3*qe+2*gamma^3*qb-
15*beta^2*qb-5*beta^2*qe+10*qb-5*gamma^2*qb-15*gamma^2*qe);
```

```
   Qv_right=1/20*La(s_eln_Qv,1)*(-gamma+beta)*(8*beta^3*qb+2*beta^3*qe-
15*beta^2*qb-5*beta^2*qe+6*beta^2*gamma*qb+4*beta^2*gamma*qe-
10*beta*gamma*qb-
10*gamma*qe*beta+4*beta*gamma^2*qb+6*beta*gamma^2*qe-5*gamma^2*qb-
15*gamma^2*qe+2*gamma^3*qb+8*gamma^3*qe);
   Mv_left=-1/60*La(s_eln_Qv,1)*(gamma-beta)*(-
30*gamma^2*La(s_eln_Qv,1)*qe+20*La(s_eln_Qv,1)*qb*beta+10*La(s_eln_Qv,1)*
qe*beta+12*La(s_eln_Qv,1)*beta^3*qb+6*La(s_eln_Qv,1)*gamma^2*qb*beta+6*L
a(s_eln_Qv,1)*gamma*qe*beta^2+9*La(s_eln_Qv,1)*gamma*qb*beta^2+9*La(s_el
n_Qv,1)*gamma^2*qe*beta+3*La(s_eln_Qv,1)*qe*beta^3+3*La(s_eln_Qv,1)*gam
ma^3*qb+12*La(s_eln_Qv,1)*gamma^3*qe+10*gamma*La(s_eln_Qv,1)*qb+20*ga
mma*La(s_eln_Qv,1)*qe-20*La(s_eln_Qv,1)*beta*qb*gamma-
10*gamma^2*La(s_eln_Qv,1)*qb-30*La(s_eln_Qv,1)*beta^2*qb-
20*gamma*La(s_eln_Qv,1)*qe*beta-10*La(s_eln_Qv,1)*beta^2*qe);
   Mv_right=1/60*La(s_eln_Qv,1)*(gamma-
beta)*(15*gamma^2*La(s_eln_Qv,1)*qe-12*La(s_eln_Qv,1)*beta^3*qb-
6*La(s_eln_Qv,1)*gamma^2*qb*beta-6*La(s_eln_Qv,1)*gamma*qe*beta^2-
9*La(s_eln_Qv,1)*gamma*qb*beta^2-9*La(s_eln_Qv,1)*gamma^2*qe*beta-
3*La(s_eln_Qv,1)*qe*beta^3-3*La(s_eln_Qv,1)*gamma^3*qb-
12*La(s_eln_Qv,1)*gamma^3*qe+10*La(s_eln_Qv,1)*beta*qb*gamma+5*gamma^
2*La(s_eln_Qv,1)*qb+15*La(s_eln_Qv,1)*beta^2*qb+10*gamma*La(s_eln_Qv,1)*
qe*beta+5*La(s_eln_Qv,1)*beta^2*qe);
   f3(n,:)=[s_eln_Qv b_eln_Qv e_eln_Qv La(s_eln_Qv,2) Qhv_left Qv_left Mv_left
Qhv_right Qv_right Mv_right];
end
%
f3=f3;
%
% 2-Verdeelde horizontale belasting:
%
f4=zeros(rQh,10);
for n = 1:rQh
   eln_Qh=Qh_load(n,2);
   for n1=1:ne
      if (elm(n1,1)==eln_Qh)
         s_eln_Qh=n1;
         b_eln_Qh=elm(n1,2);
         e_eln_Qh=elm(n1,3);
      end
   end
   qb=Qh_load(n,5);
   qe=Qh_load(n,6);
   beta=Qh_load(n,3)/La(s_eln_Qh,1);
   gamma=Qh_load(n,4)/La(s_eln_Qh,1);
   Qvh_left=0;
   Qvh_right=0;
```

```
   Mh_left=0;
   Mh_right=0;
   Qh_left=1/6*La(s_eln_Qh,1)*(-gamma+beta)*(2*qb*beta+qe*beta-
3*qe+qb*gamma-3*qb+2*qe*gamma);
   Qh_right=-1/6*La(s_eln_Qh,1)*(gamma-
beta)*(2*qb*beta+qe*beta+qb*gamma+2*qe*gamma);
   f4(n,:)=[s_eln_Qh b_eln_Qh e_eln_Qh La(s_eln_Qh,2) Qh_left Qvh_left Mh_left
Qh_right Qvh_right Mh_right];
end
f4=f4;
%
% Momentlast:
%
f5=zeros(rM,10);
for n = 1:rM
   eln_M=M_load(n,2);
   for n1=1:ne
       if (elm(n1,1)==eln_M)
           s_eln_M=n1;
           b_eln_M=elm(n1,2);
           e_eln_M=elm(n1,3);
      end
  end
   beta=M_load(n,3)/La(s_eln_M,1);
   Fmh_left=0;
   Fmh_right=0;
   Fmv_left=-6*M_load(n,4)*beta*(-1+beta)/La(s_eln_M,1);
   Fmv_right=6*M_load(n,4)*beta*(-1+beta)/La(s_eln_M,1);
   Mm_left=-M_load(n,4)*(-1+beta)*(-
3*La(s_eln_M,1)*beta+La(s_eln_M,1))/La(s_eln_M,1);
   Mm_right=M_load(n,4)*beta*(-
2*La(s_eln_M,1)+3*La(s_eln_M,1)*beta)/La(s_eln_M,1);
   f5(n,:)=[s_eln_M b_eln_M e_eln_M La(s_eln_M,2) Fmh_left Fmv_left Mm_left
Fmh_right Fmv_right Mm_right];
end
f5=f5;
%
% Primaire krachtverdeling en knoopbelasting:
%
Fmatrix=[[f1];[f2];[f3];[f4];[f5]];
rFmatrix=rFv+rFh+rQv+rQh+rM;
F=zeros(dv*nn,1);
for n=1:rFmatrix
F(3*Fmatrix(n,2)-2,1)=F(3*Fmatrix(n,2)-
2,1)+Fmatrix(n,5)*cos(Fmatrix(n,4))+Fmatrix(n,6)*sin(Fmatrix(n,4));
```

```
F(3*Fmatrix(n,2)-1,1)=F(3*Fmatrix(n,2)-1,1)-
Fmatrix(n,5)*sin(Fmatrix(n,4))+Fmatrix(n,6)*cos(Fmatrix(n,4));
F(3*Fmatrix(n,2),1)=F(3*Fmatrix(n,2),1)+Fmatrix(n,7);
F(3*Fmatrix(n,3)-2,1)=F(3*Fmatrix(n,3)-
2,1)+Fmatrix(n,8)*cos(Fmatrix(n,4))+Fmatrix(n,9)*sin(Fmatrix(n,4));
F(3*Fmatrix(n,3)-1,1)=F(3*Fmatrix(n,3)-1,1)-
Fmatrix(n,8)*sin(Fmatrix(n,4))+Fmatrix(n,9)*cos(Fmatrix(n,4));
F(3*Fmatrix(n,3),1)=F(3*Fmatrix(n,3),1)+Fmatrix(n,10);
end
%
% Stijfheidsmatrix van het gehele systeem:
%
Ks=zeros(nn*dv,nn*dv);
for n = 1:ne
   alpha=La(n,2);
   L=La(n,1);
   E=elm(n,4);
   A=elm(n,5);
   I=elm(n,6);
   Be=[-cos(alpha) sin(alpha) 0 cos(alpha) -sin(alpha) 0
      sin(alpha)/L cos(alpha)/L -1 -sin(alpha)/L -cos(alpha)/L 0
      -sin(alpha)/L -cos(alpha)/L 0 sin(alpha)/L cos(alpha)/L 1];
   De=[E*A/L 0 0;0 4*E*I/L -2*E*I/L;0 -2*E*I/L 4*E*I/L];
   BeT=Be';
   Ke=BeT*De*Be;
   Ks(elm(n,2)*3-2:elm(n,2)*3,elm(n,2)*3-2:elm(n,2)*3)=Ks(elm(n,2)*3-
2:elm(n,2)*3,elm(n,2)*3-2:elm(n,2)*3)+Ke(1:3,1:3);
   Ks(elm(n,2)*3-2:elm(n,2)*3,elm(n,3)*3-2:elm(n,3)*3)=Ks(elm(n,2)*3-
2:elm(n,2)*3,elm(n,3)*3-2:elm(n,3)*3)+Ke(1:3,4:6);
   Ks(elm(n,3)*3-2:elm(n,3)*3,elm(n,3)*3-2:elm(n,3)*3)=Ks(elm(n,3)*3-
2:elm(n,3)*3,elm(n,3)*3-2:elm(n,3)*3)+Ke(4:6,4:6);
   Ks(elm(n,3)*3-2:elm(n,3)*3,elm(n,2)*3-2:elm(n,2)*3)=Ks(elm(n,3)*3-
2:elm(n,3)*3,elm(n,2)*3-2:elm(n,2)*3)+Ke(4:6,1:3);
end
%
% Gereduseerde stijfheidsmatrix van het gehele systeem en de gereduseerde
belastingvector:
%
nu_zero=0;
for n = 1:nn*dv
   if (U(n,1)==0.0)
      nu_zero=nu_zero+1;
   end
end
nksr=nn*dv-nu_zero;
%
```

```
Ksr=zeros(nksr,nksr);
Fr=zeros(nksr,1);
nrKsr=0;
for nr = 1:nn*dv
   if (U(nr,1)~=0.0)
      nrKsr=nrKsr+1;
      Fr(nrKsr,1)=F(nr,1);
      ncKsr=0;
      for nc = 1:nn*dv
         if (U(nc,1)~=0.0)
            ncKsr=ncKsr+1;
            Ksr(nrKsr,ncKsr)=Ks(nr,nc);
         end
      end
   end
end
%
% Gereduseerde verplaatsingvector:
%
Ur=inv(Ksr)*Fr;
%
nUr=1;
for n = 1:nn*dv
   if (U(n,1)==1)
      U(n,1)=Ur(nUr,1);
      nUr=nUr+1;
   end
end
%
% Belastingvector van het gehele systeem:
%
Fs=Ks*U;
%
% Oplegreacties:
%
nu_zero=0;
for n = 1:nn*dv
   if (U(n,1)==0.0)
      nu_zero=nu_zero+1;
   end
end
nrFrr=nu_zero;
Frr=zeros(nrFrr,1);
Fpr=zeros(nrFrr,1);
nrFrr=0;
for n1=1:nn*dv
```

```
  if (U(n1,1)==0)
    nrFrr=nrFrr+1;
    Frr(nrFrr,1)=Fs(n1,1);
    Fpr(nrFrr,1)=F(n1,1);
    oplegreacties(nrFrr,1)=Frr(nrFrr,1)-Fpr(nrFrr,1);
  end
end
oplegreacties
pause
%
% Spaningsreultanten 'se'
%
for n = 1:ne
  alpha=La(n,2);
  L=La(n,1);
  E=elm(n,4);
  A=elm(n,5);
  I=elm(n,6);
  Be=[-cos(alpha) sin(alpha) 0 cos(alpha) -sin(alpha) 0
    sin(alpha)/L cos(alpha)/L -1 -sin(alpha)/L -cos(alpha)/L 0
    -sin(alpha)/L -cos(alpha)/L 0 sin(alpha)/L cos(alpha)/L 1];
  De=[E*A/L 0 0;0 4*E*I/L -2*E*I/L;0 -2*E*I/L 4*E*I/L];
  BeT=Be';
  Ke=BeT*De*Be;
  Ue(1:3)=U(elm(n,2)*3-2:elm(n,2)*3);
  Ue(4:6)=U(elm(n,3)*3-2:elm(n,3)*3);
  Fe=Ke*Ue';
  LeLe(n,1)=n;
  LeLe(n,2)=L;
  LeLe(n,3)=alpha;
  LeLe(n,4)=kcr(elm(n,2),2);
  LeLe(n,5)=kcr(elm(n,2),3);
  se(n,:)=(De*Be*Ue')';
end
%
% Momentenlijn:
%
sese=[[LeLe],[se]];
x_step=100;
for n = 1:ne
  L=sese(n,2);
  nM_local=1;
  for x=0:L/x_step:L
  xM_local(nM_local,n)=x;
%   coor_glob(nM_local,1)=x_local*cos(sese(n,3))+sese(n,7);
%   coor_glob(nM_local,2)=-x_local*sin(sese(n,3))+sese(n,8);
```

```
   M_local(nM_local,n)=sese(n,8)+(sese(n,7)-sese(n,8))*(L-x)/L;
   for nn=1:rFv
      if (Fv_load(nn,2)==n)
         beta=Fv_load(nn,3)/L;
         if (x<=Fv_load(nn,3))
            M_local(nM_local,n)=M_local(nM_local,n)+(Fv_load(nn,4)*(-
1+beta)^2*(2*beta*x-L*beta+x));
         else

M_local(nM_local,n)=M_local(nM_local,n)+(beta^2*Fv_load(nn,4)*(2*beta*x-
L*beta-3*x+2*L));
         end
      end
   end
   for nn=1:rQv
      if (Qv_load(nn,2)==n)
         beta=Qv_load(nn,3)/L;
         gamma=Qv_load(nn,4)/L;
         qb=Qv_load(nn,5);
         qe=Qv_load(nn,6);
         if (x<=Qv_load(nn,3))
            M_local(nM_local,n)=M_local(nM_local,n)+(1/60*L*(gamma-beta)*(-
9*L*gamma^2*qe*beta+6*x*qb*gamma^3-20*L*qb*beta-10*L*qe*beta-
12*L*beta^3*qb+10*L*gamma^2*qb-3*L*qb*gamma^3-
12*L*gamma^3*qe+30*L*gamma^2*qe+10*L*beta^2*qe+30*L*beta^2*qb+20*L
*gamma*beta*qe+20*L*beta*qb*gamma+24*x*beta^3*qb+6*x*beta^3*qe-
3*L*beta^3*qe+24*x*gamma^3*qe-6*L*beta^2*qe*gamma-
6*L*qb*gamma^2*beta+18*x*gamma^2*qe*beta+12*x*qb*gamma^2*beta+12*x*
beta^2*qe*gamma+18*x*gamma*qb*beta^2-9*L*gamma*qb*beta^2-
15*x*beta^2*qe-45*x*qb*beta^2+30*x*qb+30*x*qe-20*L*gamma*qe-
15*gamma^2*x*qb-45*gamma^2*x*qe-10*gamma*L*qb-30*gamma*x*qb*beta-
30*gamma*x*beta*qe));
         else
            if (x<=Qv_load(nn,4))

M_local(nM_local,n)=M_local(nM_local,n)+(1/60*(10*L^3*beta^4*qe+30*L^3*bet
a^4*qb+30*L^3*beta*qe*gamma^2-20*gamma^3*L^3*qe-
40*L^3*beta^3*qb*gamma-
30*gamma*L*qb*x^2+30*L*qe*beta*x^2+10*L^3*gamma^4*qb+30*L^3*gamma
^4*qe-30*L^2*x*gamma^4*qe*beta-
60*L^2*x*beta*qe*gamma+60*L^2*x*beta^3*gamma*qb+60*L^2*x*gamma^3*b
eta*qe+15*L^3*beta^4*gamma*qb-
30*L^2*x*beta^4*gamma*qb+15*L^3*gamma^4*qe*beta+6*L^2*x*beta^5*qe-
3*L^3*beta^5*qe-12*L^3*beta^5*qb-40*L^3*gamma^3*beta*qe-
10*x^3*qe+10*x^3*qb-
10*qb*L^3*gamma^3+6*L^2*x*gamma^5*qb+24*L^2*x*gamma^5*qe-
```

```
15*L^2*x*gamma^4*qb-12*L^3*gamma^5*qe-
3*L^3*gamma^5*qb+30*L^2*x*gamma^2*qe+30*L^2*x*qb*gamma^2-
45*L^2*x*gamma^4*qe-45*L^2*x*beta^4*qb-
15*L^2*x*beta^4*qe+24*L^2*x*beta^5*qb)/L/(gamma-beta));
            else
               M_local(nM_local,n)=M_local(nM_local,n)+(1/60*L*(gamma-beta)*(-
9*L*gamma^2*qe*beta+6*x*qb*gamma^3-12*L*beta^3*qb+10*L*gamma^2*qb-
3*L*qb*gamma^3-
12*L*gamma^3*qe+30*L*gamma^2*qe+10*L*beta^2*qe+30*L*beta^2*qb+20*L
*gamma*beta*qe+20*L*beta*qb*gamma+24*x*beta^3*qb+6*x*beta^3*qe-
3*L*beta^3*qe+24*x*gamma^3*qe-6*L*beta^2*qe*gamma-
6*L*qb*gamma^2*beta+18*x*gamma^2*qe*beta+12*x*qb*gamma^2*beta+12*x*
beta^2*qe*gamma+18*x*gamma*qb*beta^2-9*L*gamma*qb*beta^2-
15*x*beta^2*qe-45*x*qb*beta^2-15*gamma^2*x*qb-45*gamma^2*x*qe-
30*gamma*x*qb*beta-30*gamma*x*beta*qe));
            end
         end
      end
   end
   for nn=1:rM
      if (M_load(nn,2)==n)
         beta=M_load(nn,3)/L;
         if (x<=M_load(nn,3))
            M_local(nM_local,n)=M_local(nM_local,n)+(-M_load(nn,4)*(-
1+beta)*(6*beta*x-3*L*beta+L)/L);
         else
            M_local(nM_local,n)=M_local(nM_local,n)+(-M_load(nn,4)*beta*(-
6*x+6*beta*x+4*L-3*L*beta)/L);
         end
      end
   end
   nM_local=nM_local+1;
end
end
xM_local;
M_local;
[xM_local(:,1),M_local(:,1)];
plot(xM_local(:,1),M_local(:,1));
pause
[xM_local(:,2),M_local(:,2)];
plot(xM_local(:,2),M_local(:,2));
pause
[xM_local(:,3),M_local(:,3)];
plot(xM_local(:,3),M_local(:,3));
pause
[xM_local(:,4),M_local(:,4)];
```

```
plot(xM_local(:,4),M_local(:,4));
pause
[xM_local(:,5),M_local(:,5)];
plot(xM_local(:,5),M_local(:,5));
pause

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%
%
% Normaalkrachtlijn:
%
sese=[[LeLe],[se]];
x_step=100;
for n = 1:ne
   L=sese(n,2);
   nN_local=1;
   for x=0:L/x_step:L
   xN_local(nN_local,n)=x;
%   coor_glob(nN_local,1)=x_local*cos(sese(n,3))+sese(n,7);
%   coor_glob(nN_local,2)=-x_local*sin(sese(n,3))+sese(n,8);
   N_local(nN_local,n)=sese(n,6);
   for nn=1:rFh
      if (Fh_load(nn,2)==n)
         beta=Fh_load(nn,3)/L;
         if (x<=Fh_load(nn,3))
            N_local(nN_local,n)=N_local(nN_local,n)+(-Fh_load(nn,4)*(-1+beta));
         else
            N_local(nN_local,n)=N_local(nN_local,n)+(-beta*Fh_load(nn,4));
         end
      end
   end
   for nn=1:rQh
      if (Qh_load(nn,2)==n)
         beta=Qh_load(nn,3)/L;
         gamma=Qh_load(nn,4)/L;
         qb=Qh_load(nn,5);
         qe=Qh_load(nn,6);
         if (x<=Qh_load(nn,3))
            N_local(nN_local,n)=N_local(nN_local,n)+(1/6*(-
gamma+beta)*(2*qb*beta+qe*beta-3*qe+qb*gamma-3*qb+2*qe*gamma)*L);
         else
            if (x<=Qh_load(nn,4))
               N_local(nN_local,n)=N_local(nN_local,n)+(-1/6*(-
6*qb*gamma*L*x+3*qb*x^2-
3*qe*x^2+6*qe*L*beta*x+3*qb*gamma^2*L^2+3*qe*gamma^2*L^2-
```

```
6*qe*L^2*beta*gamma+3*L^2*beta^2*qb*gamma+3*gamma^2*L^2*qe*beta-
2*gamma^3*L^2*qe-gamma^3*L^2*qb-2*L^2*beta^3*qb-L^2*beta^3*qe)/((-
gamma+beta)*L));
            else
               N_local(nN_local,n)=N_local(nN_local,n)+(1/6*L*(-
gamma+beta)*(2*qb*beta+qe*beta+qb*gamma+2*qe*gamma));
            end
         end
      end
   end

   nN_local=nN_local+1;
end
end
xN_local;
N_local;
[xN_local(:,1),N_local(:,1)];
plot(xN_local(:,1),N_local(:,1));
pause
[xN_local(:,2),N_local(:,2)];
plot(xN_local(:,2),N_local(:,2));
pause
[xN_local(:,3),N_local(:,3)];
plot(xN_local(:,3),N_local(:,3));
pause
[xN_local(:,4),N_local(:,4)];
plot(xN_local(:,4),N_local(:,4));
pause
[xN_local(:,5),N_local(:,5)];
plot(xN_local(:,5),N_local(:,5));
pause

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
%
% Dwarskrachtlijn:
%
sese=[[LeLe],[se]];
x_step=100;
for n = 1:ne
   L=sese(n,2);
   nV_local=1;
   for x=0:L/x_step:L
   xV_local(nV_local,n)=x;
%   coor_glob(nV_local,1)=x_local*cos(sese(n,3))+sese(n,7);
```

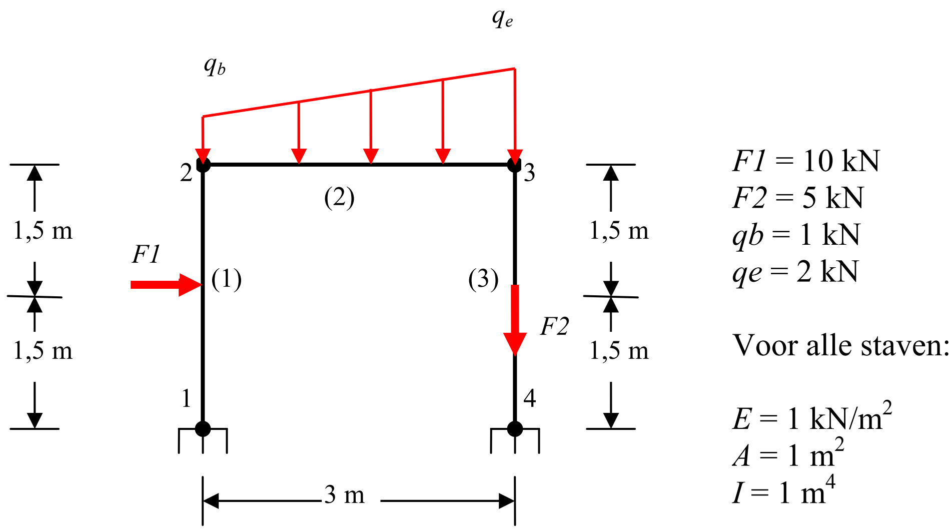
```
%   coor_glob(nV_local,2)=-x_local*sin(sese(n,3))+sese(n,8);
   V_local(nV_local,n)=(sese(n,8)-sese(n,7))/L;
   for nn=1:rFv
      if (Fv_load(nn,2)==n)
         beta=Fv_load(nn,3)/L;
         if (x<=Fv_load(nn,3))

V_local(nV_local,n)=V_local(nV_local,n)+(Fv_load(nn,4)*(2*beta+1)*(beta-1)^2);
         else
            V_local(nV_local,n)=V_local(nV_local,n)+(Fv_load(nn,4)*beta^2*(-
3+2*beta));
         end
      end
   end
   for nn=1:rQv
      if (Qv_load(nn,2)==n)
         beta=Qv_load(nn,3)/L;
         gamma=Qv_load(nn,4)/L;
         qb=Qv_load(nn,5);
         qe=Qv_load(nn,6);
         if (x<=Qv_load(nn,3))
            V_local(nV_local,n)=V_local(nV_local,n)+(-1/20*L*(-
gamma+beta)*(6*beta^2*gamma*qb+4*beta^2*gamma*qe+4*beta*gamma^2*qb+
6*beta*gamma^2*qe+10*qe-10*gamma*qe*beta-
10*beta*gamma*qb+8*beta^3*qb+2*beta^3*qe+8*gamma^3*qe+2*gamma^3*qb-
15*beta^2*qb-5*beta^2*qe+10*qb-5*gamma^2*qb-15*gamma^2*qe));
         else
            if (x<=Qv_load(nn,4))
               V_local(nV_local,n)=V_local(nV_local,n)+(1/20*(20*qb*gamma*L*x-
20*qe*L*beta*x-10*qb*x^2+10*qe*x^2-
10*qe*gamma^2*L^2+5*gamma^4*L^2*qb+15*gamma^4*L^2*qe-
2*gamma^5*L^2*qb-8*gamma^5*L^2*qe-
10*qb*gamma^2*L^2+15*L^2*beta^4*qb+5*L^2*beta^4*qe-8*L^2*beta^5*qb-
2*L^2*beta^5*qe+20*qe*L^2*beta*gamma+10*L^2*beta^4*qb*gamma+10*gam
ma^4*L^2*qe*beta-20*L^2*beta^3*qb*gamma-20*gamma^3*L^2*qe*beta)/(L*(-
gamma+beta)));
            else
               V_local(nV_local,n)=V_local(nV_local,n)+(-1/20*L*(-
gamma+beta)*(8*beta^3*qb+2*beta^3*qe-15*beta^2*qb-
5*beta^2*qe+6*beta^2*gamma*qb+4*beta^2*gamma*qe-10*beta*gamma*qb-
10*gamma*qe*beta+4*beta*gamma^2*qb+6*beta*gamma^2*qe-5*gamma^2*qb-
15*gamma^2*qe+2*gamma^3*qb+8*gamma^3*qe));
            end
         end
      end
   end
```

```
   for nn=1:rM
      if (M_load(nn,2)==n)
         beta=M_load(nn,3)/L;
         if (x<=M_load(nn,3))
            V_local(nV_local,n)=V_local(nV_local,n)+(-6*M_load(nn,4)*beta*(-
1+beta)/L);
         else
            V_local(nV_local,n)=V_local(nV_local,n)+(-6*M_load(nn,4)*beta*(-
1+beta)/L);
         end
      end
   end
   nV_local=nV_local+1;
end
end
xV_local;
V_local;
[xV_local(:,1),V_local(:,1)];
plot(xV_local(:,1),V_local(:,1));
pause
[xV_local(:,2),V_local(:,2)];
plot(xV_local(:,2),V_local(:,2));
pause
[xV_local(:,3),V_local(:,3)];
plot(xV_local(:,3),V_local(:,3));
pause
[xV_local(:,4),V_local(:,4)];
plot(xV_local(:,4),V_local(:,4));
pause
[xV_local(:,5),V_local(:,5)];
plot(xV_local(:,5),V_local(:,5)
```

Bijlage C. Toetsing van het rekenprogramma

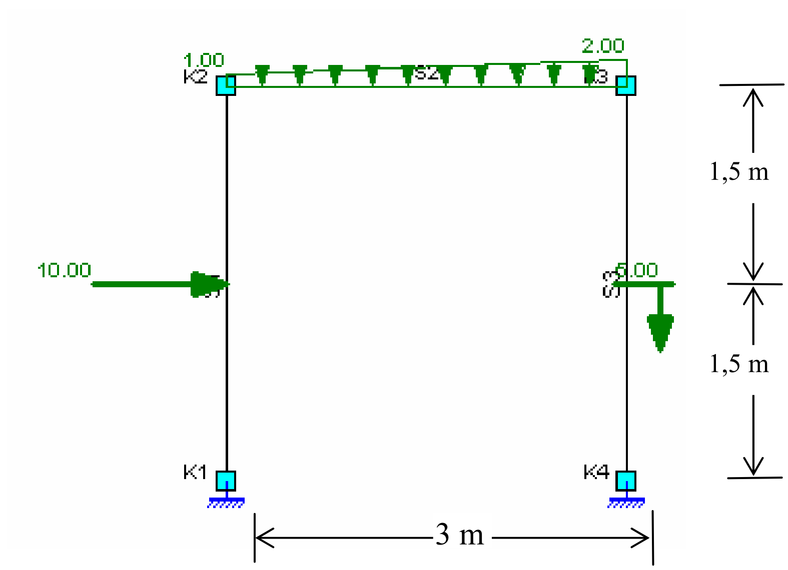
Voorbeeld 1

Er wordt het portaal van figuur 2.11 met behulp van beide programma's behandeld.

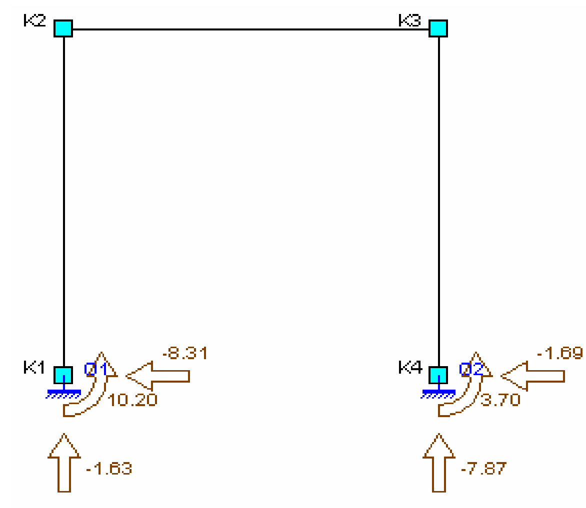


Figuur C. 1: Orthogonale portaal

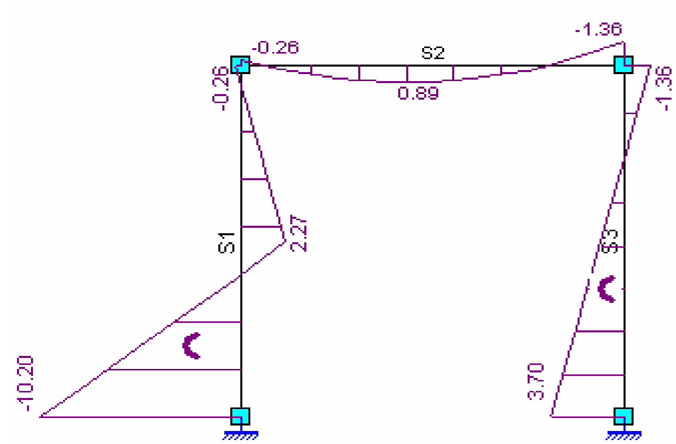
De uitkomsten van de MatrixFrame voor dit portaal zijn:



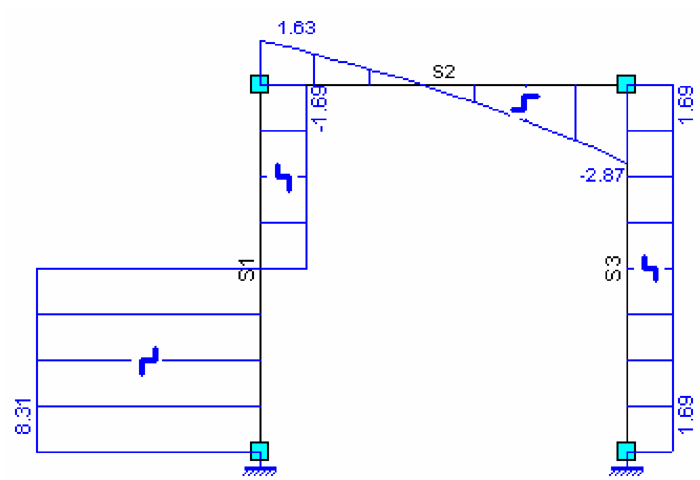
Figuur C.2: Belastingen op het portaal



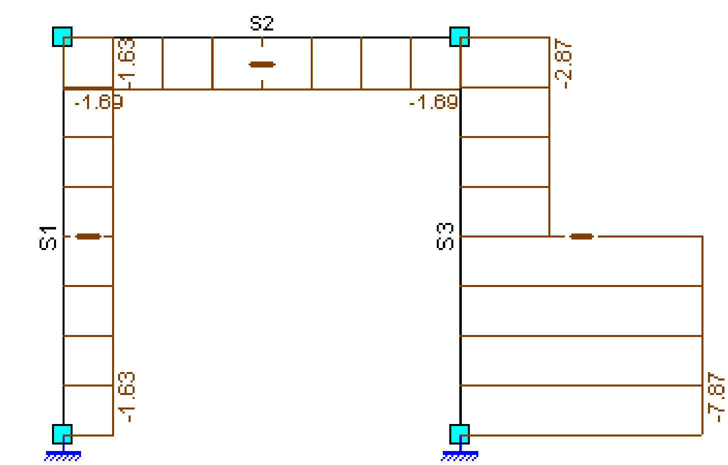
Figuur C.3: Oplegreactie en momentreacties



Figuur C.4: Momentenlijnen.



Figuur C.5: Dwarskrachtenlijnen



Figuur C.6: Normaalkrachtlijnen

Hier wordt de uikomsten van ons programma bekeken:

- Oplegreacties:

```
> In voorbeeld1 at 40

oplegreacties =

   -8.3125
   -1.6328
   10.1991
   -1.6875
   -7.8672
    3.6991
```

Figuur C.7: Oplegreacties uit ons programma

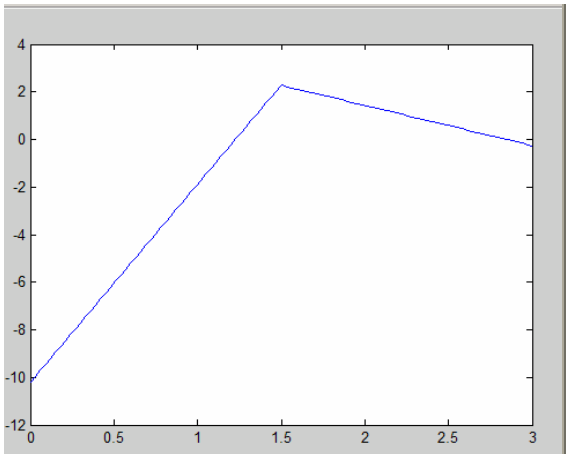
Oplegreacties en momentreactie van de knoop 1:

F_1x = -8,3125 kN
F_1z = -1,6328 kN
M_1y = 10,1991 kN.m

Oplegreacties en momentreactie van de knoop 4:

F_4x = -1,6875 kN
F_4z = -7,8672 kN
M_4y = 3,6991 kN.m

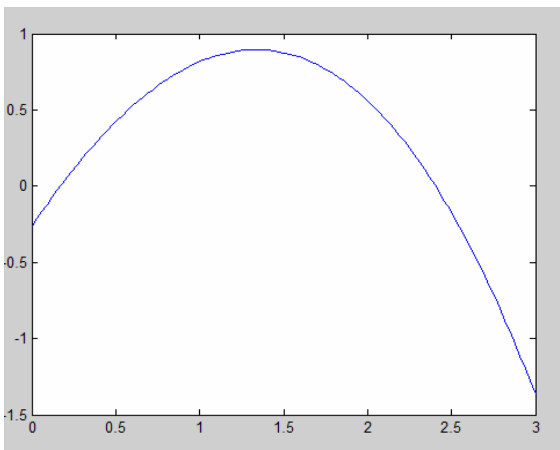
- Momentenlijnen:



ans =

x	M(x)
0	-10.1991
0.3000	-7.7054
0.6000	-5.2116
0.9000	-2.7179
1.2000	-0.2241
1.5000	2.2696
1.8000	1.7634
2.1000	1.2571
2.4000	0.7509
2.7000	0.2446
3.0000	-0.2616

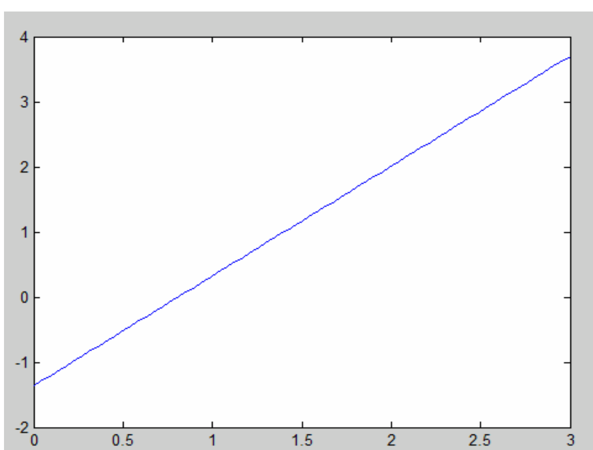
Figuur C.8: Momentenverloop van het element 1 uit ons programma



ans =

x	M(x)
0	-0.2616
0.3000	0.1817
0.6000	0.5260
0.9000	0.7623
1.2000	0.8817
1.5000	0.8750
1.8000	0.7333
2.1000	0.4477
2.4000	0.0090
2.7000	-0.5917
3.0000	-1.3634

Figuur C.9: Momentenverloop van het element 2 uit ons programma

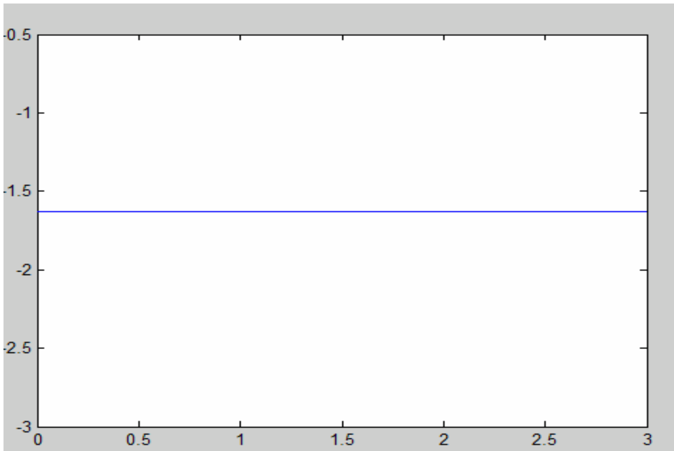


ans =

x	M(x)
0	-1.3634
0.3000	-0.8571
0.6000	-0.3509
0.9000	0.1554
1.2000	0.6616
1.5000	1.1679
1.8000	1.6741
2.1000	2.1804
2.4000	2.6866
2.7000	3.1929
3.0000	3.6991

Figuur C.10: Momentenverloop van het element 3 uit ons programma

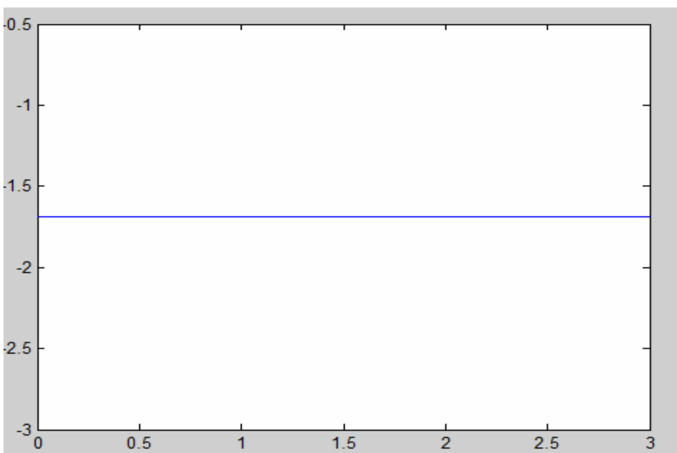
- Normaalkrachtlijnen:



ans =

x	N(x)
0	-1.6328
0.3000	-1.6328
0.6000	-1.6328
0.9000	-1.6328
1.2000	-1.6328
1.5000	-1.6328
1.8000	-1.6328
2.1000	-1.6328
2.4000	-1.6328
2.7000	-1.6328
3.0000	-1.6328

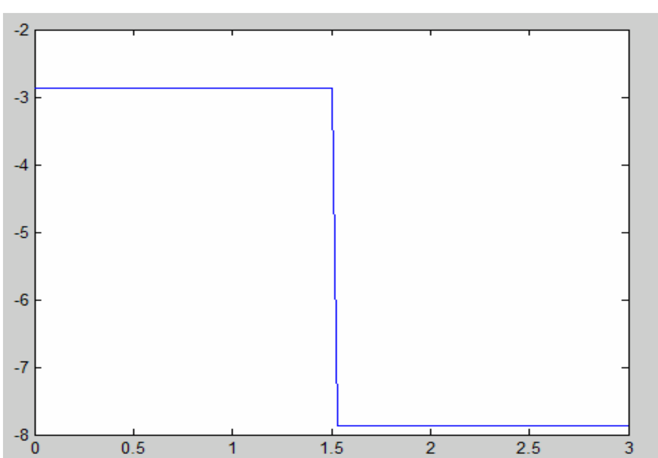
Figuur C.11: Normaalkracht verloop van het element 1 uit ons programma



ans =

x	N(x)
0	-1.6875
0.3000	-1.6875
0.6000	-1.6875
0.9000	-1.6875
1.2000	-1.6875
1.5000	-1.6875
1.8000	-1.6875
2.1000	-1.6875
2.4000	-1.6875
2.7000	-1.6875
3.0000	-1.6875

Figuur 2. C.12: Normaalkracht verloop van het element 2 uit ons programma

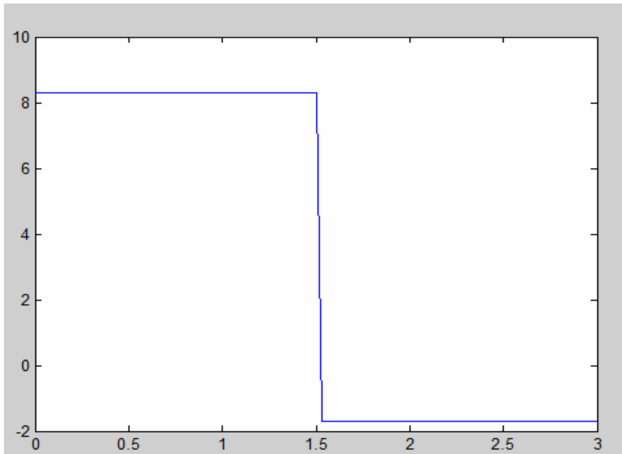


ans =

x	N(x)
0	-2.8672
0.3000	-2.8672
0.6000	-2.8672
0.9000	-2.8672
1.2000	-2.8672
1.5000	-2.8672
1.8000	-7.8672
2.1000	-7.8672
2.4000	-7.8672
2.7000	-7.8672
3.0000	-7.8672

Figuur C.13: Normaalkracht verloop van het element 3 uit ons programma

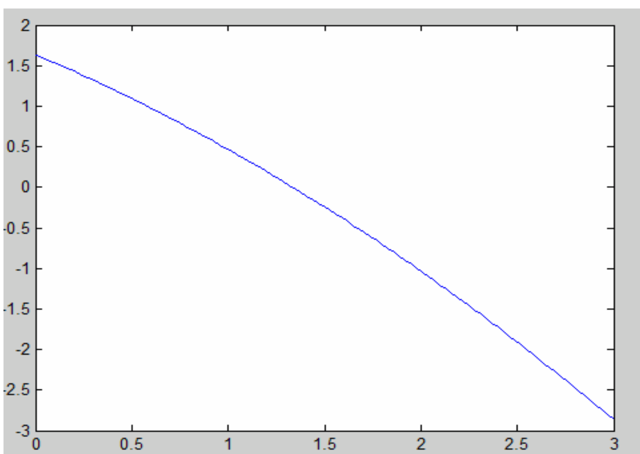
- Dwarskrachtenlijnen:



ans =

x	*V(x)*
0	8.3125
0.3000	8.3125
0.6000	8.3125
0.9000	8.3125
1.2000	8.3125
1.5000	8.3125
1.8000	-1.6875
2.1000	-1.6875
2.4000	-1.6875
2.7000	-1.6875
3.0000	-1.6875

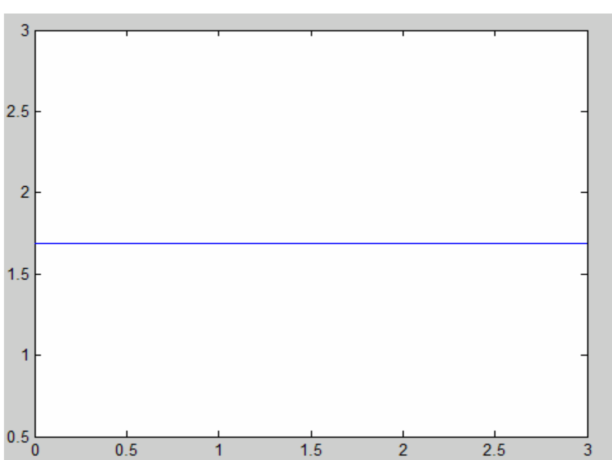
Figuur C.14: Dwarskrachtverloop van het element 1 uit ons programma



ans =

x	*V(x)*
0	1.6328
0.3000	1.3178
0.6000	0.9728
0.9000	0.5978
1.2000	0.1928
1.5000	-0.2422
1.8000	-0.7072
2.1000	-1.2022
2.4000	-1.7272
2.7000	-2.2822
3.0000	-2.8672

Figuur C.15: Dwarskrachtverloop van het element 2 uit ons programma



ans =

x	*V(x)*
0	1.6875
0.3000	1.6875
0.6000	1.6875
0.9000	1.6875
1.2000	1.6875
1.5000	1.6875
1.8000	1.6875
2.1000	1.6875
2.4000	1.6875
2.7000	1.6875
3.0000	1.6875

Figuur C.16: Dwarskrachtverloop van het element 3 uit ons programma

Er wordt gemerkt dat de uitkomsten van de MatrixFrame en die van ons programma dezelfde zijn.

Neem maar een paar voorbeelden hiervan:

De oplegreacties van de knoop 4.

De uitkomsten van de MatrixFrame:

F_4x = -1,69 kN
F_4z = -7,87 kN
M_4y = 3,70 kN.m

De uitkomsten van het programma:

F_4x = -1,6875 kN
F_4z = -7,8672 kN
M_4y = 3,6991 kN.m

De momenten van het element 2.

De uitkomsten van de MatrixFrame:

M_2 = -0,26 kN.m
M_3 = 0,89 kN.m
M_{max}= -1,36 kN.m

De uitkomsten van het programma:

M_2 = -0,2616 kN.m
M_3 = 0,8875 kN.m
M_{max}= -1,3634 kN.m

De dwarskrachten van het element 1.

De uitkomsten van de MatrixFrame:

V_1 = 8,31 kN
V_2 = -1,69 kN

De uitkomsten van het programma:

V_1 = 8,3125 kN
V_2 = -1,6875 kN

De normaalkrachten van het element 3.

De uitkomsten van de MatrixFrame:

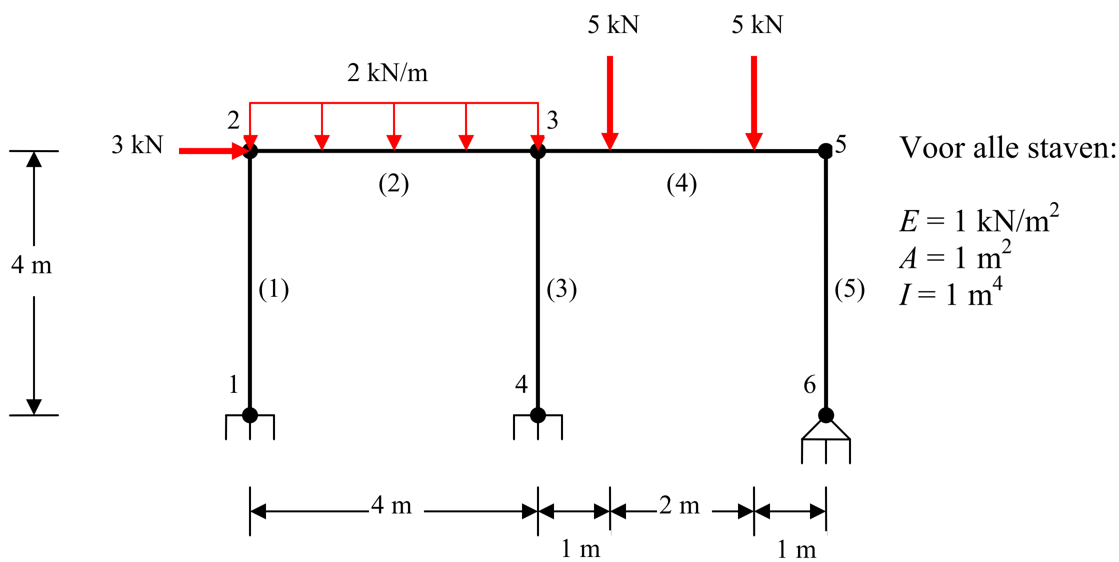
$N_3 = -2{,}87$ kN
$N_4 = -7{,}87$ kN

De uitkomsten van het programma:

$N_3 = -2{,}8672$ kN
$N_4 = -7{,}8672$ kN

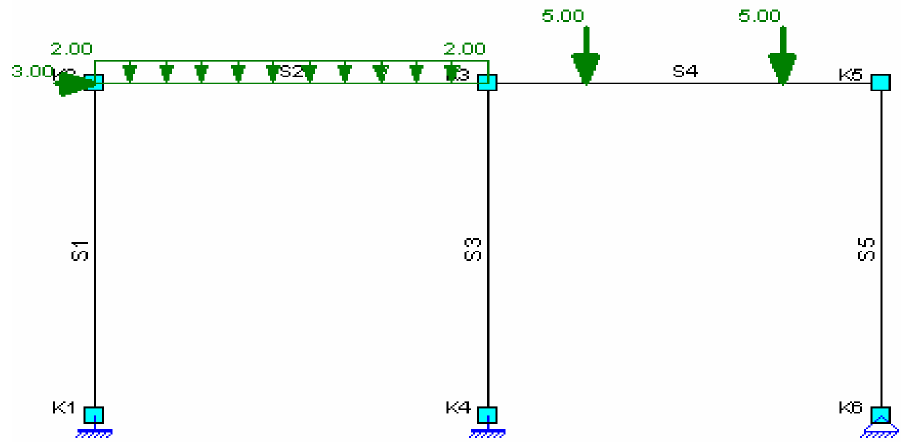
Voorbeeld 2

Er wordt het portaal van figuur 2.27 met behulp van beide programma's behandeld.

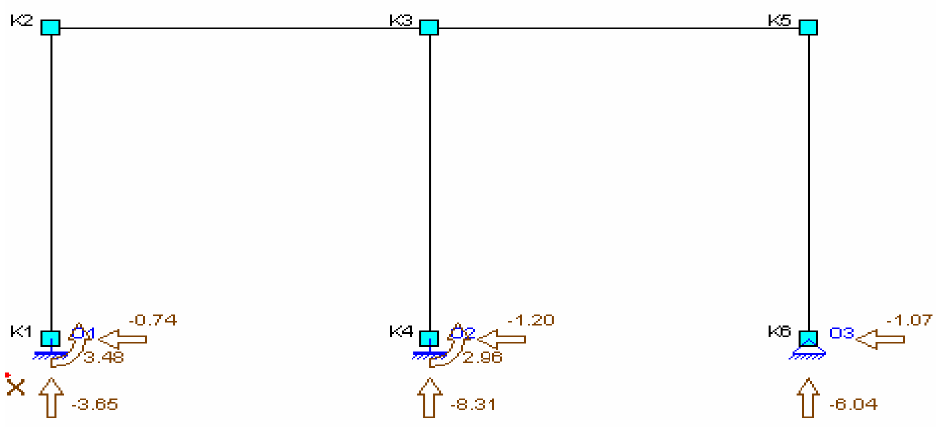


Figuur C.17: een raamwerk met twee overspanningen

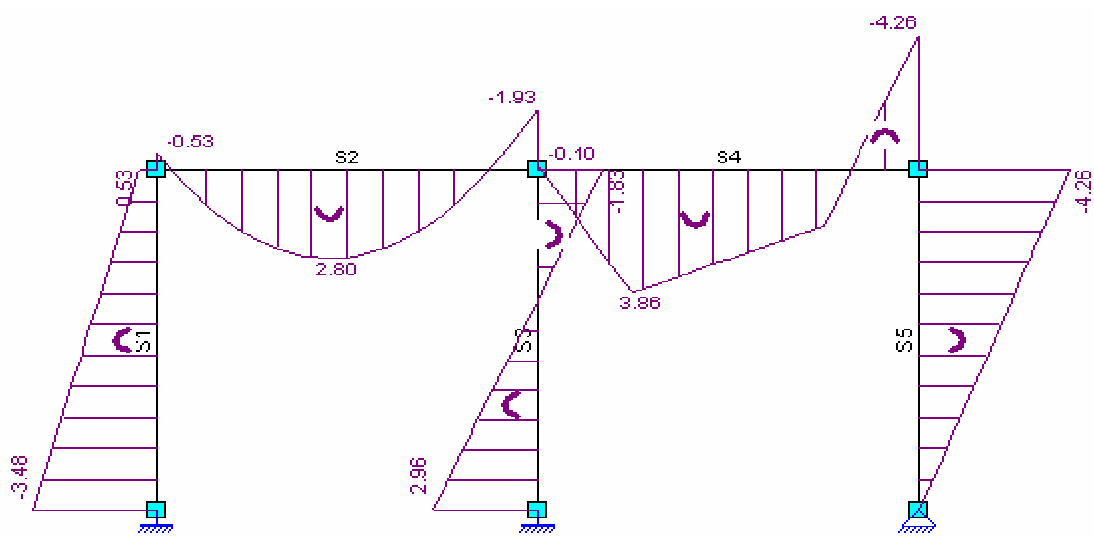
De uitkomsten van de MatrixFrame voor dit raamwerk zijn:



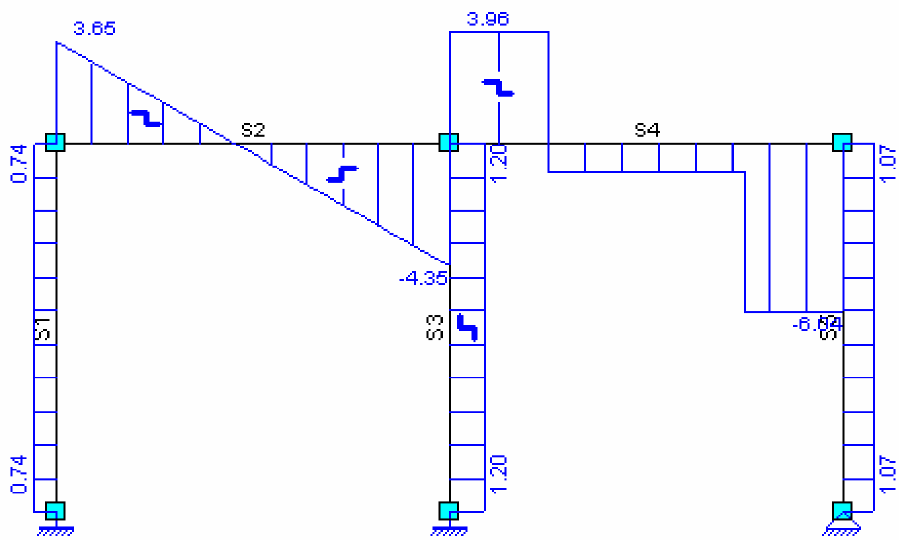
Figuur C.18: Belastingen op het raamwerk



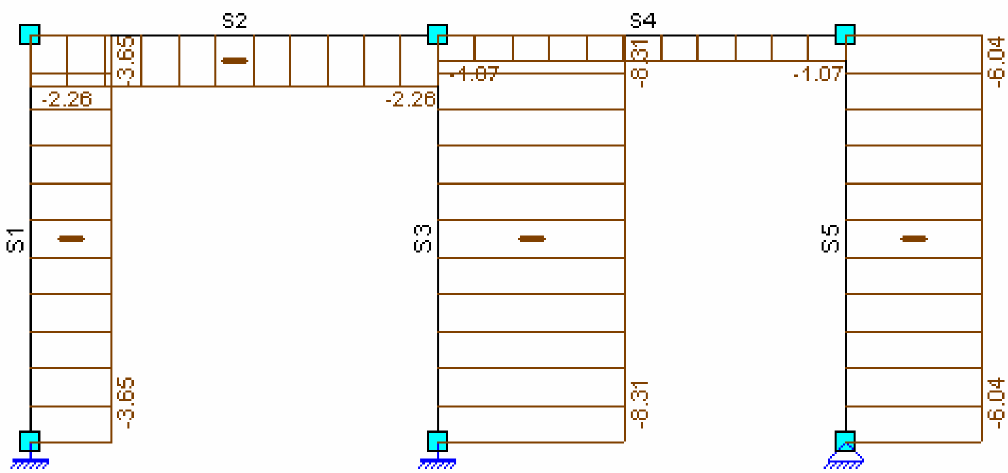
Figuur C.19: Oplegreactie en momentreacties



Figuur C.20: Momentenlijnen



Figuur C.21: Dwarskrachtenlijnen



Figuur C.22: Normaalkrachtlijnen

We zullen nu de uikomsten van ons programma bekijken:

- Oplegreacties:

```
oplegreacties =

   -0.7375
   -3.6488
    3.4765
   -1.1973
   -8.3110
    2.9583
   -1.0652
   -6.0402
```

Figuur C.23: Oplegreacties uit ons programma

Oplegreacties en momentreactie van de knoop 1:

F_1x = -0,7375 kN
F_1z = -3,6488 kN
M_1y = 3,4765 kN.m

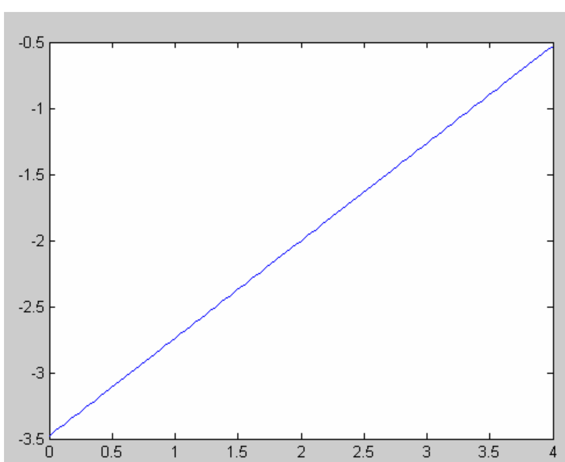
Oplegreacties en momentreactie van de knoop 4:

F_4x = -1,1973 kN
F_4z = -8,3110 kN
M_4y = 2,9583 kN.mm

Oplegreacties van de knoop 6:

F_4x = -1,0652 kN
F_4z = -6,0402 kN

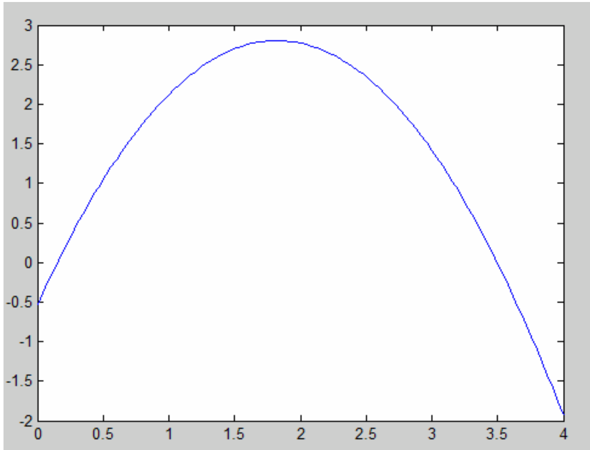
- Momentenlijnen:



ans =

x	**M(x)**
0	-3.4765
0.4000	-3.1815
0.8000	-2.8865
1.2000	-2.5915
1.6000	-2.2965
2.0000	-2.0015
2.4000	-1.7065
2.8000	-1.4115
3.2000	-1.1165
3.6000	-0.8215
4.0000	-0.5265

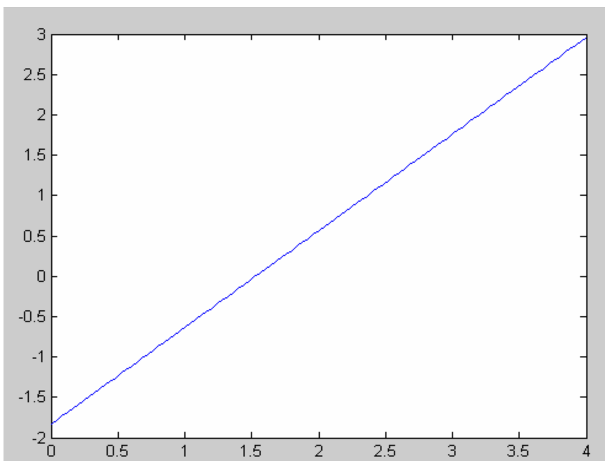
Figuur C.24: Momentenverloop van het element 1 uit ons programma



ans =

x	M(x)
0	-0.5265
0.4000	0.7730
0.8000	1.7525
1.2000	2.4121
1.6000	2.7516
2.0000	2.7711
2.4000	2.4707
2.8000	1.8502
3.2000	0.9097
3.6000	-0.3507
4.0000	-1.9312

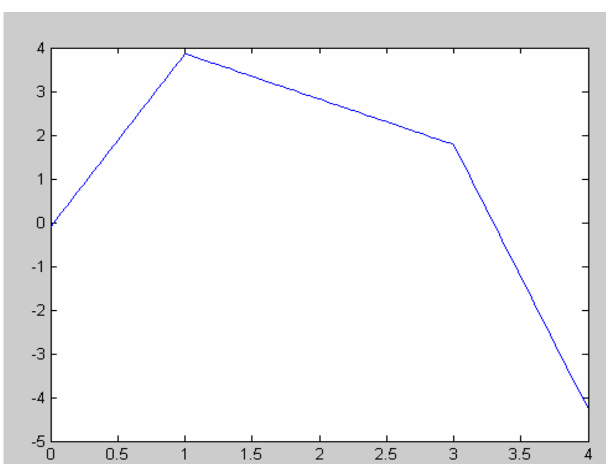
Figuur C.25: Momentenverloop van het element 2 uit ons programma



ans =

x	M(x)
0	-1.8309
0.4000	-1.3520
0.8000	-0.8730
1.2000	-0.3941
1.6000	0.0848
2.0000	0.5637
2.4000	1.0426
2.8000	1.5215
3.2000	2.0004
3.6000	2.4794
4.0000	2.9583

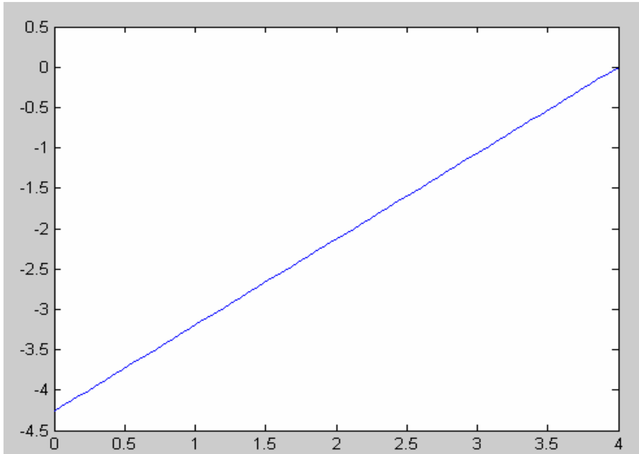
Figuur C.26: Momentenverloop van het element 3 uit ons programma



ans =

x	M(x)
0	-0.1003
0.4000	1.4836
0.8000	3.0676
1.2000	3.6515
1.6000	3.2354
2.0000	2.8194
2.4000	2.4033
2.8000	1.9872
3.2000	0.5712
3.6000	-1.8449
4.0000	-4.2609

Figuur C.27: Momentenverloop van het element 4 uit ons programma

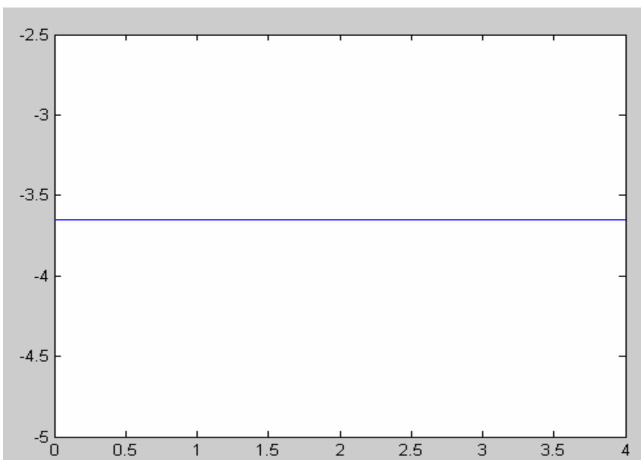


ans =

x	M(x)
0	-4.2609
0.4000	-3.8348
0.8000	-3.4088
1.2000	-2.9827
1.6000	-2.5566
2.0000	-2.1305
2.4000	-1.7044
2.8000	-1.2783
3.2000	-0.8522
3.6000	-0.4261
4.0000	0.0000

Figuur C.28: Momentenverloop van het element 5 uit ons programma

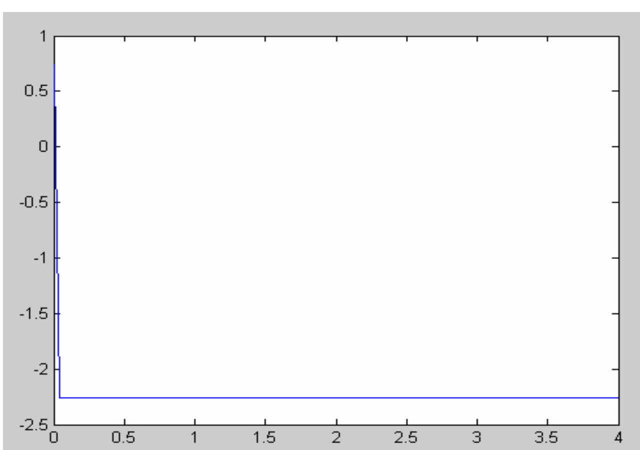
- Normaalkrachtenlijnen:



ans =

x	N(x)
0	-3.6488
0.4000	-3.6488
0.8000	-3.6488
1.2000	-3.6488
1.6000	-3.6488
2.0000	-3.6488
2.4000	-3.6488
2.8000	-3.6488
3.2000	-3.6488
3.6000	-3.6488
4.0000	-3.6488

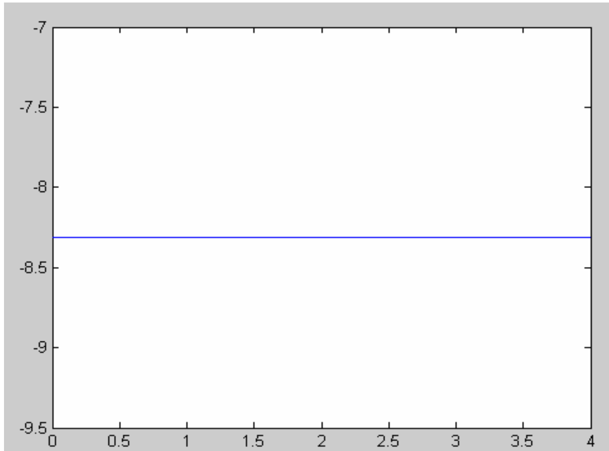
Figuur C.29: Normaalkracht verloop van het element 1 uit ons programma



ans =

x	N(x)
0	0.7375
0.4000	-2.2625
0.8000	-2.2625
1.2000	-2.2625
1.6000	-2.2625
2.0000	-2.2625
2.4000	-2.2625
2.8000	-2.2625
3.2000	-2.2625
3.6000	-2.2625
4.0000	-2.2625

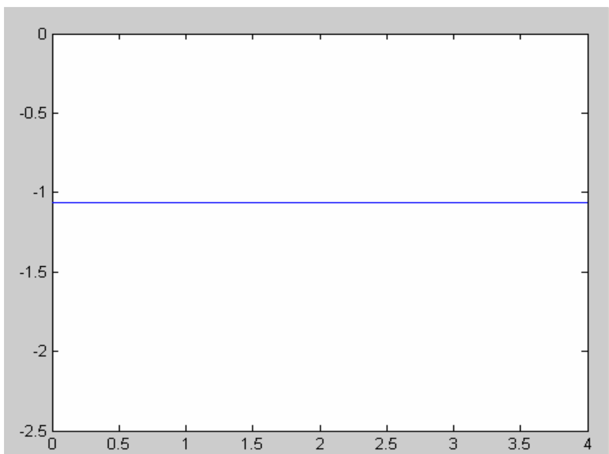
Figuur C.30: Normaalkracht verloop van het element 2 uit ons programma



ans =

x	N(x)
0	-8.3110
0.4000	-8.3110
0.8000	-8.3110
1.2000	-8.3110
1.6000	-8.3110
2.0000	-8.3110
2.4000	-8.3110
2.8000	-8.3110
3.2000	-8.3110
3.6000	-8.3110
4.0000	-8.3110

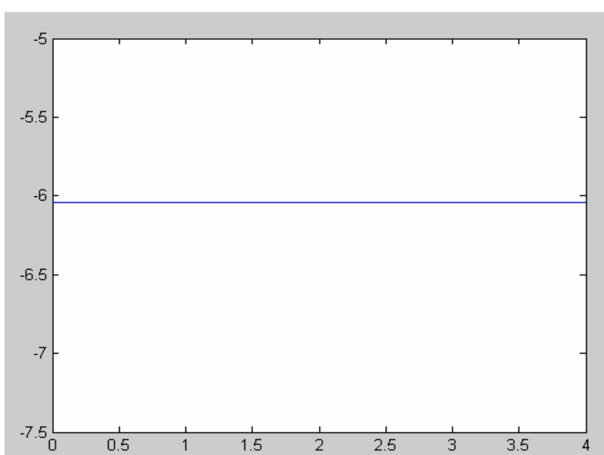
Figuur C.31: Normaalkracht verloop van het element 3 uit ons programma



ans =

x	N(x)
0	-1.0652
0.4000	-1.0652
0.8000	-1.0652
1.2000	-1.0652
1.6000	-1.0652
2.0000	-1.0652
2.4000	-1.0652
2.8000	-1.0652
3.2000	-1.0652
3.6000	-1.0652
4.0000	-1.0652

Figuur C.32: Normaalkracht verloop van het element 4 uit ons programma

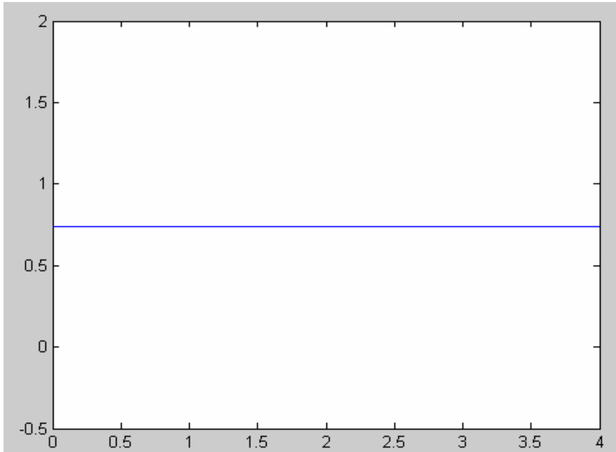


ans =

x	N(x)
0	-6.0402
0.4000	-6.0402
0.8000	-6.0402
1.2000	-6.0402
1.6000	-6.0402
2.0000	-6.0402
2.4000	-6.0402
2.8000	-6.0402
3.2000	-6.0402
3.6000	-6.0402
4.0000	-6.0402

Figuur C.33: Normaalkracht verloop van het element 5 uit ons programma

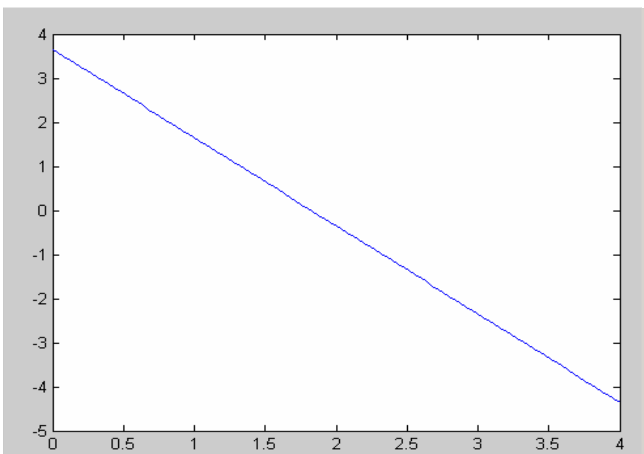
- Dwarskrachtenlijnen:



ans =

x	V(x)
0	0.7375
0.4000	0.7375
0.8000	0.7375
1.2000	0.7375
1.6000	0.7375
2.0000	0.7375
2.4000	0.7375
2.8000	0.7375
3.2000	0.7375
3.6000	0.7375
4.0000	0.7375

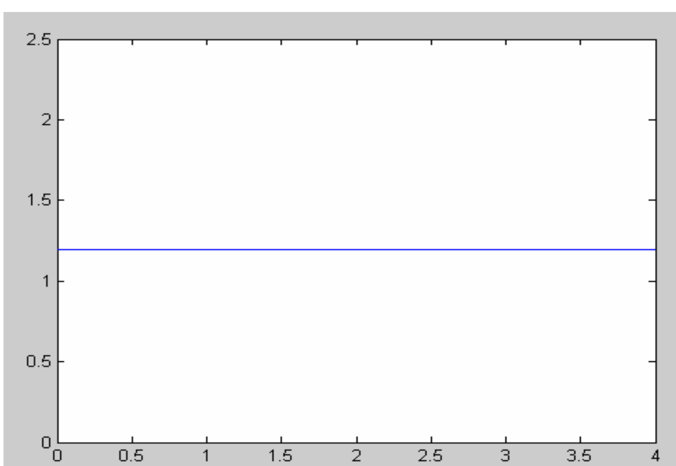
Figuur C.34: Dwarskrachtverloop van het element 1 uit ons programma



ans =

x	V(x)
0	3.6488
0.4000	2.8488
0.8000	2.0488
1.2000	1.2488
1.6000	0.4488
2.0000	-0.3512
2.4000	-1.1512
2.8000	-1.9512
3.2000	-2.7512
3.6000	-3.5512
4.0000	-4.3512

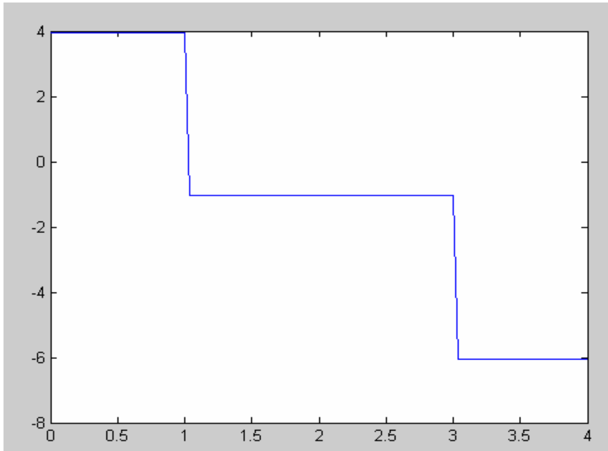
Figuur C.35: Dwarskrachtverloop van het element 2 uit ons programma



ans =

x	V(x)
0	1.1973
0.4000	1.1973
0.8000	1.1973
1.2000	1.1973
1.6000	1.1973
2.0000	1.1973
2.4000	1.1973
2.8000	1.1973
3.2000	1.1973
3.6000	1.1973
4.0000	1.1973

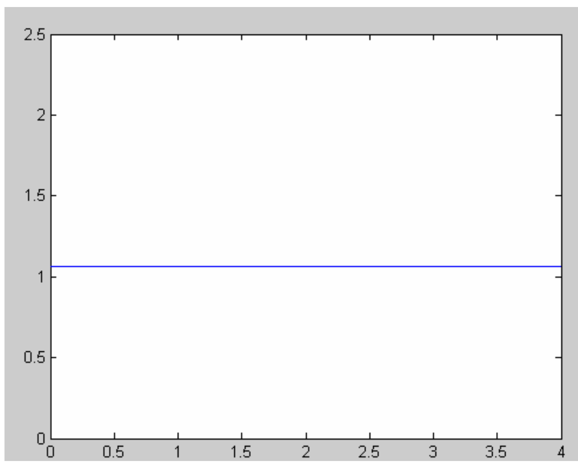
Figuur C.36: Dwarskrachtverloop van het element 3 uit ons programma



ans =

x	V(x)
0	3.9598
0.4000	3.9598
0.8000	3.9598
1.2000	-1.0402
1.6000	-1.0402
2.0000	-1.0402
2.4000	-1.0402
2.8000	-1.0402
3.2000	-6.0402
3.6000	-6.0402
4.0000	-6.0402

Figuur C.37: Dwarskrachtverloop van het element 4 uit ons programma



ans =

x	V(x)
0	1.0652
0.4000	1.0652
0.8000	1.0652
1.2000	1.0652
1.6000	1.0652
2.0000	1.0652
2.4000	1.0652
2.8000	1.0652
3.2000	1.0652
3.6000	1.0652
4.0000	1.0652

Figuur C.38: Dwarskrachtverloop van het element 5 uit ons programma

Er wordt gemerkt dat de uitkomsten van de MatrixFrame en die van ons programma dezelfde zijn.

Neem maar een paar voorbeelden hiervan:

De oplegreacties van de knoop 4.

De uitkomsten van de MatrixFrame:

F_4x = -1,20 kN
F_4z = -8,31 kN
M_4y = 2,96 kN.m

De uitkomsten van het programma:

$F_{4}x$ = -1,1973 kN
$F_{4}z$ = -8,3110 kN
$M_{4}y$ = 2,9583 kN.m

De momenten van het element 2.

De uitkomsten van de MatrixFrame:

M_2 = -0,53 kN.m
M_3 = -1,93 kN.m
M_{max}= 2,8 kN.m

De uitkomsten van het programma:

M_2 = -0,53 kN.m
M_3 = -1,9312 kN.m
M_{max}= 2,7911 kN.m

De dwarskrachten van het element 3.

De uitkomsten van de MatrixFrame:

V_1 = 3,96 kN
V_m = -1,04 kN
V_2 = -6,04 kN

De uitkomsten van het programma:

V_1 = 3,96 kN
V_m = -1,0402 kN
V_2 = -6,0402 kN

De normaalkrachten van het element 5.

De uitkomsten van de MatrixFrame:

N_3 = -6,04 kN
N_4 = -6,04 kN

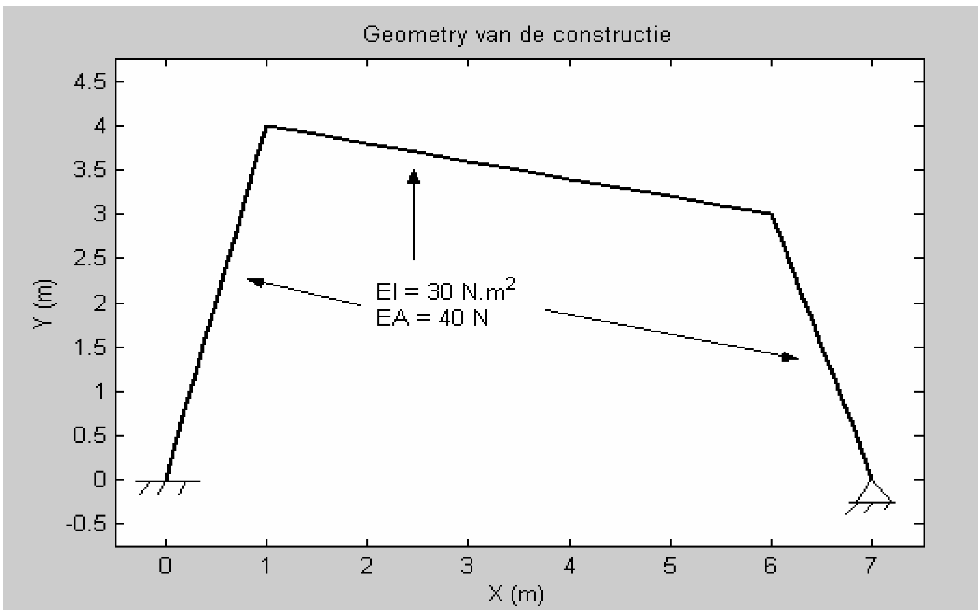
De uitkomsten van het programma:

N_3 = -6,0402 kN
N_4 = -6,0402 kN

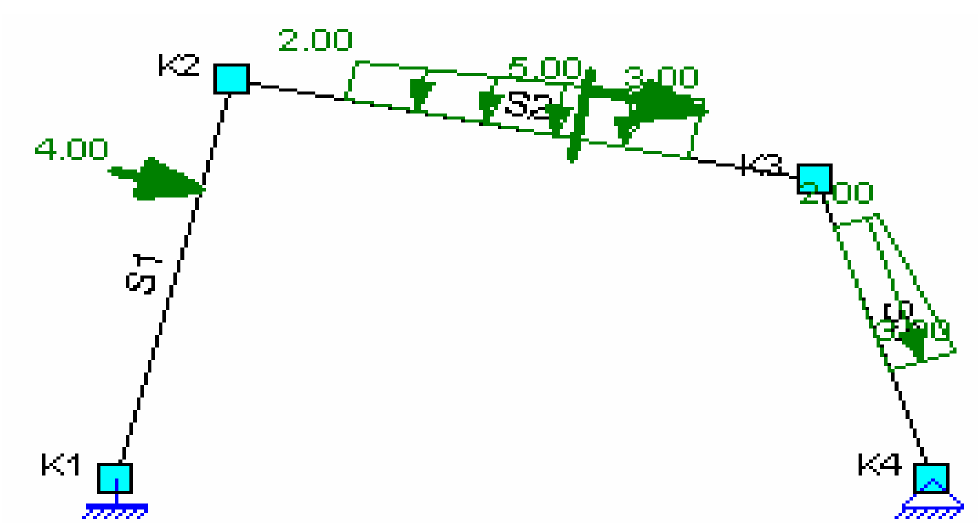
Bijlage D. Toetsing van het plotten van de rekenresultaten

Voorbeeld 1

Er wordt nu de onderstaande constructie met bijbehorende gegevens met behulp van de MatrixFrame en het rekenprogramma behandeld.

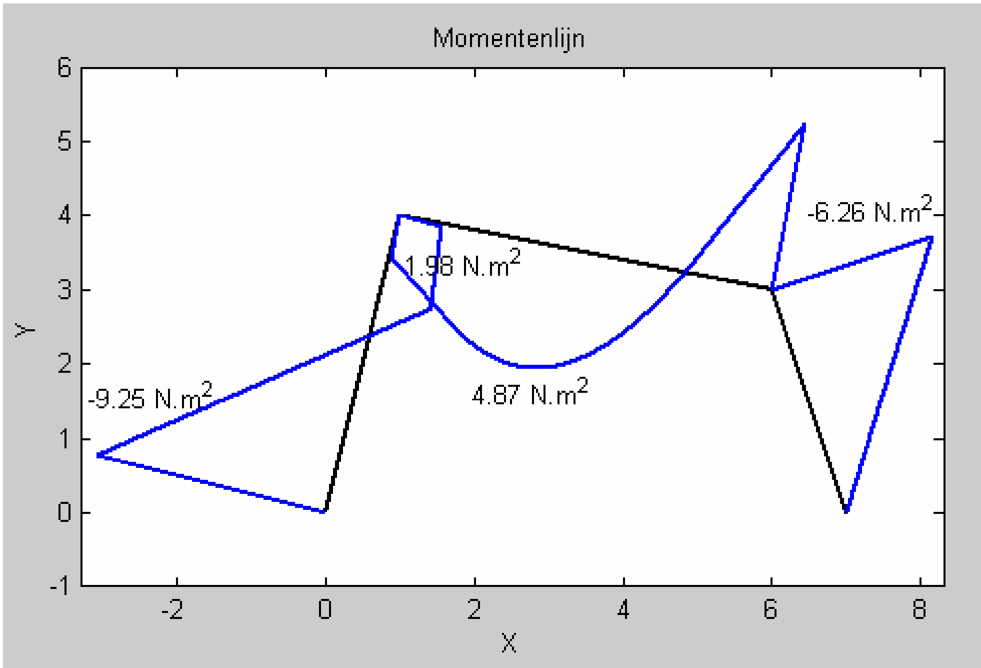


D.1a: Programma

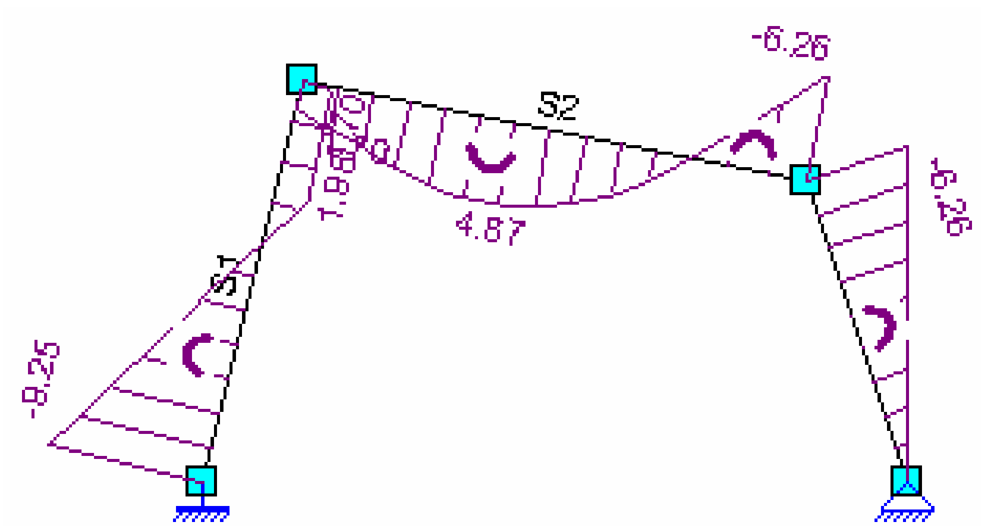


D.1b: MatrixFrame

Figuur D.1: Geometrie en belastinggeval geplot door het programma en de MatrixFrame



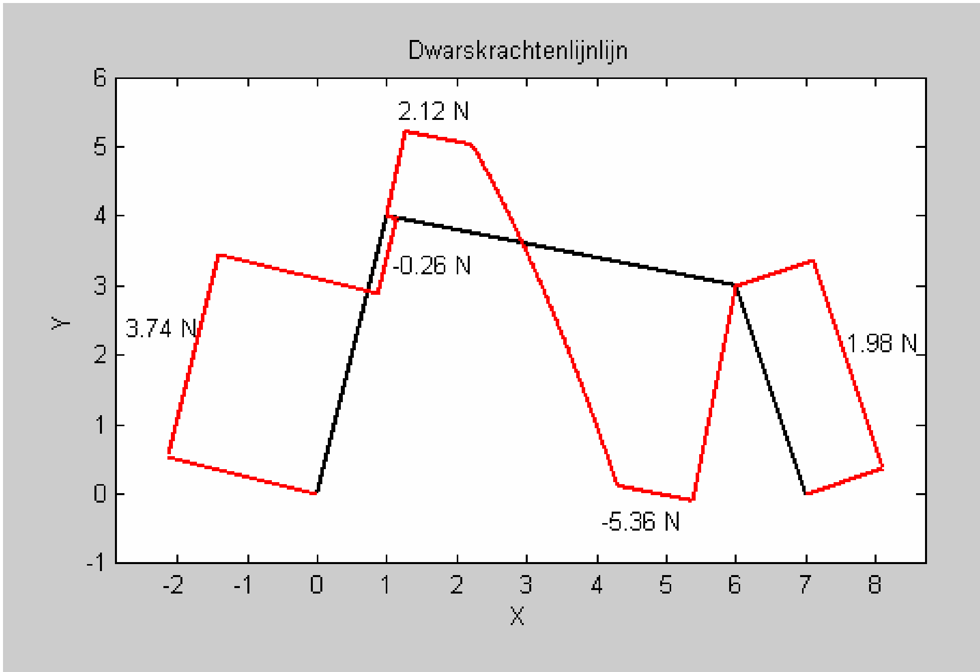
D.2a: Programma



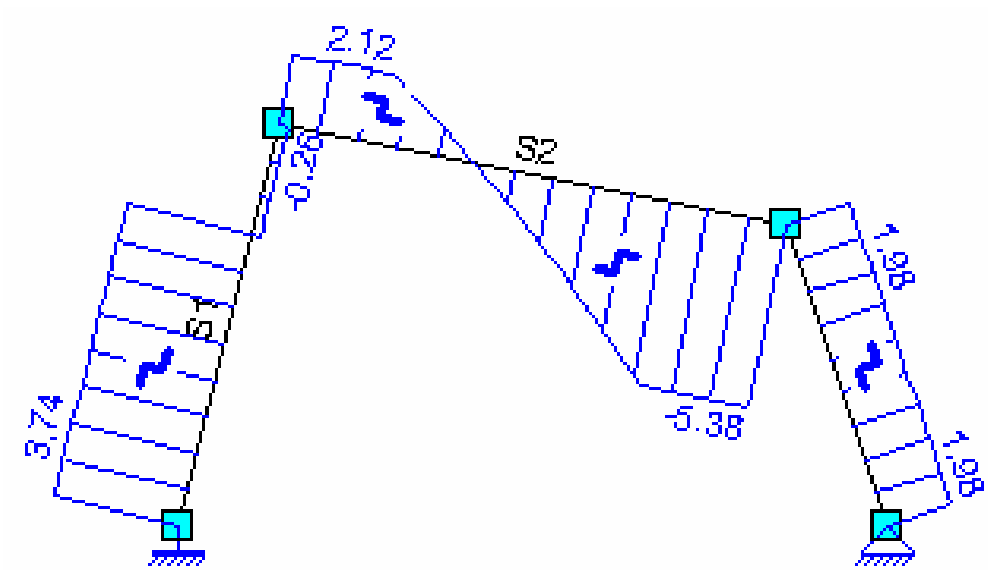
D.2b: MatrixFrame

FiguurD.2: Momentlijnen geplot door het programma en de MatrixFrame

Hier is te zien dat de resultaten voor de geplotte momentlijnen precies hetzelfde zijn.



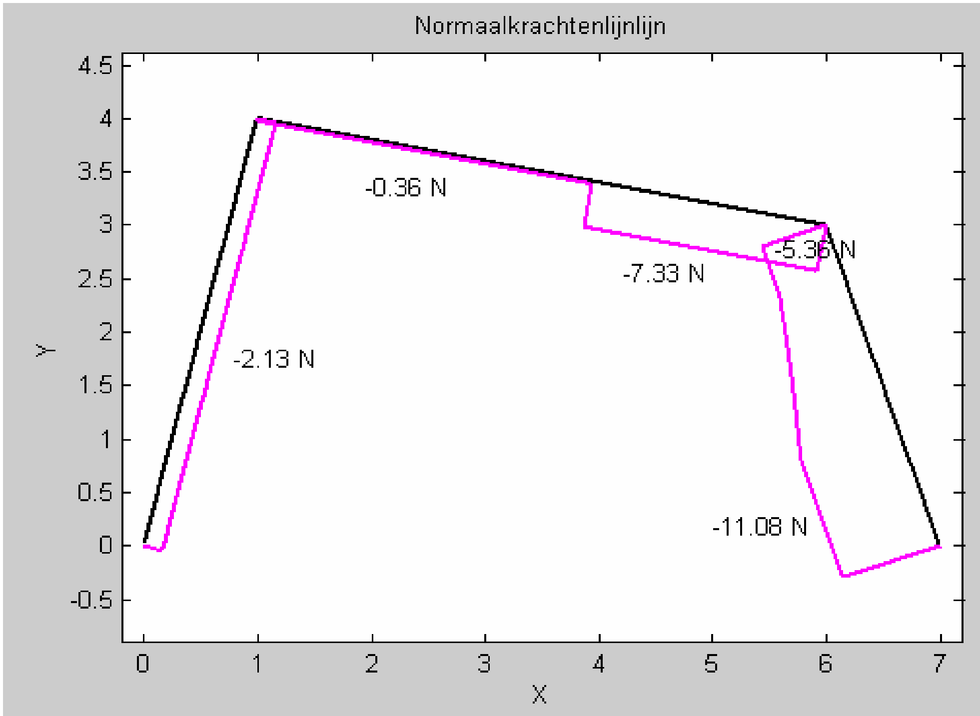
D.3a: Programma



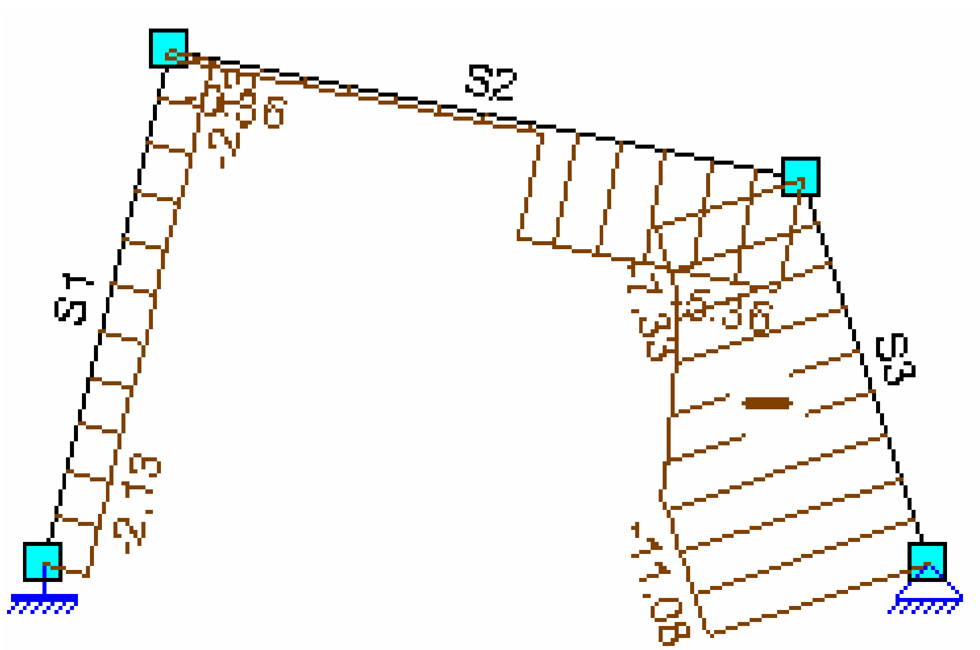
D.3b: MatrixFrame

Figuur D.3: Dwarskrachtlijnen geplot door het programma en de MatrixFrame

Hier is te zien dat de resultaten voor de geplotte dwarskrachtlijnen precies hetzelfde zijn.



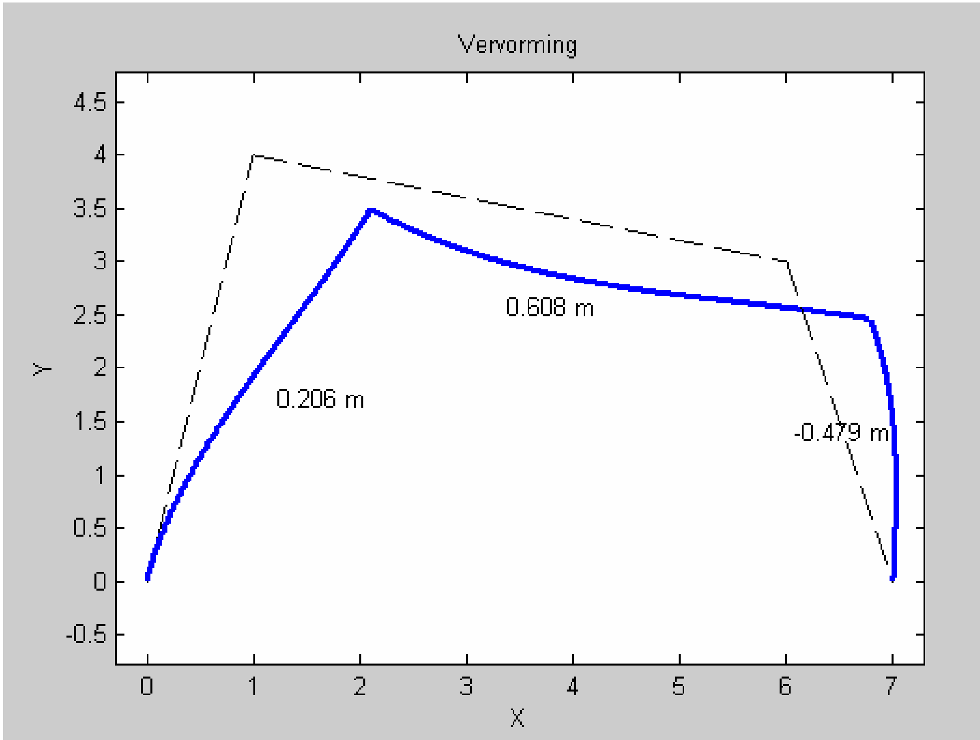
D.4a: Programma



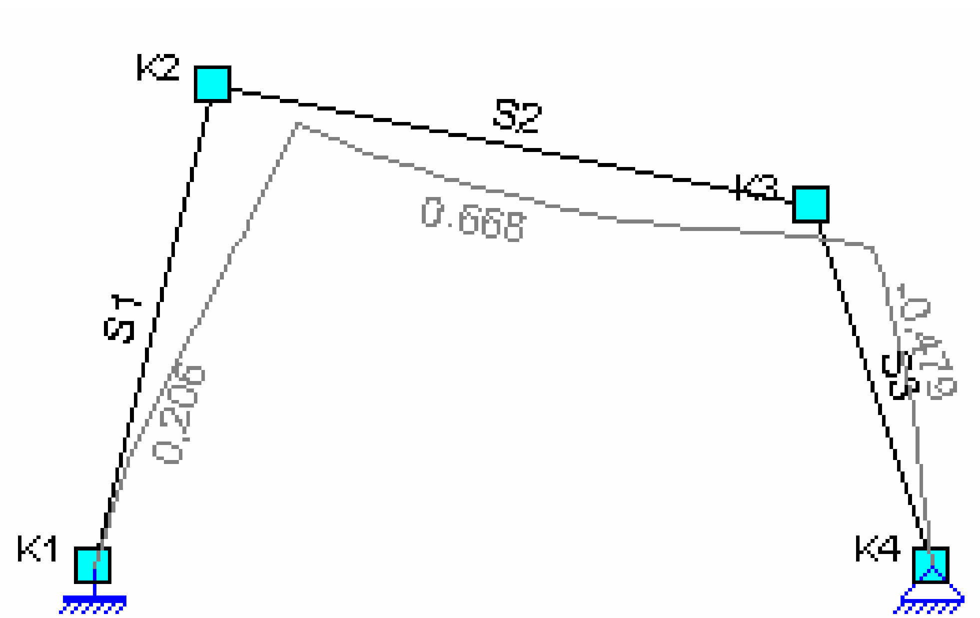
D.4b: MatrixFrame

Figuur D.4: Normaalkrachtlijnen geplot door het programma en de MatrixFrame

Hier is te zien dat de resultaten voor de geplotte normaalkrachtlijnen precies hetzelfde zijn.



D.5a: Programma



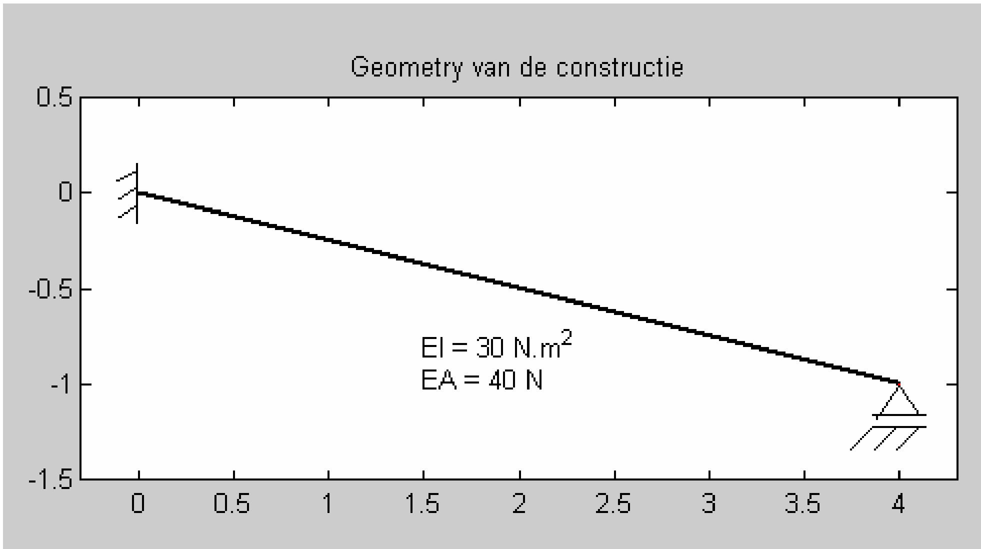
D.5b: MatrixFrame

Figuur D.5: Vervorming van de constructie geplot door het programma en de MatrixFrame

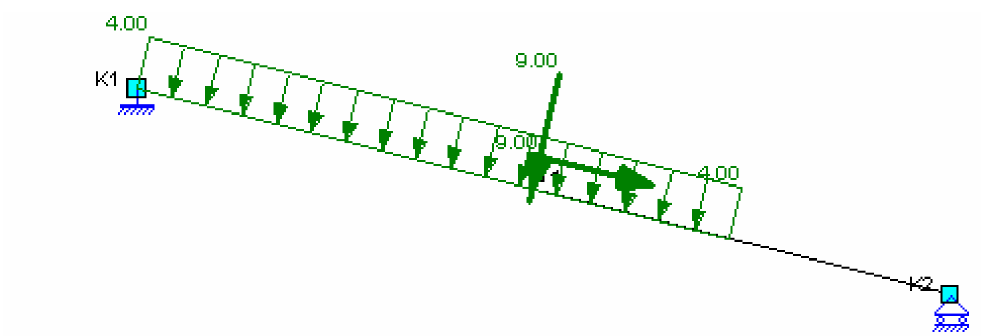
Hier is te zien dat de resultaten voor de geplotte vervorming precies hetzelfde zijn.

Voorbeeld 2

Er wordt vervolgens de onderstaande constructie met bijbehorende gegevens met behulp van de MatrixFrame en het rekenprogramma behandeld.



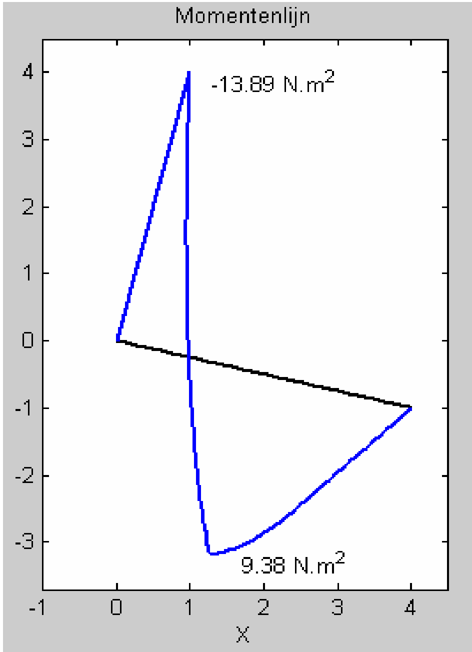
D.6a: Programma



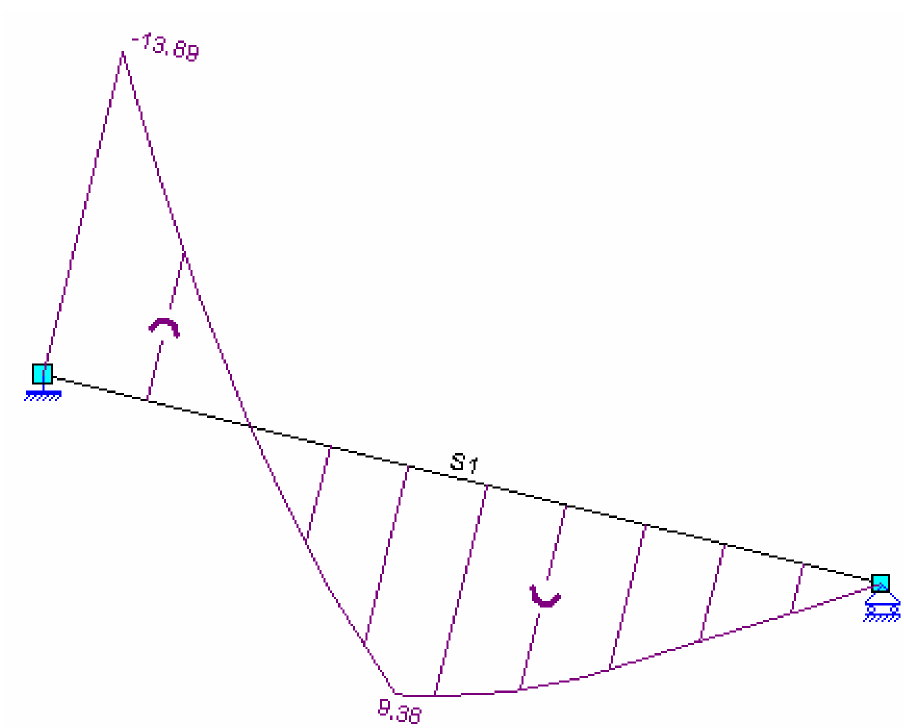
D.6b: MatrixFrame

Figuur D.6: Geometrie en belastinggeval geplot door het programma en de MatrixFrame

Hier is te zien dat de resultaten voor de geplotte constructie precies hetzelfde zijn.



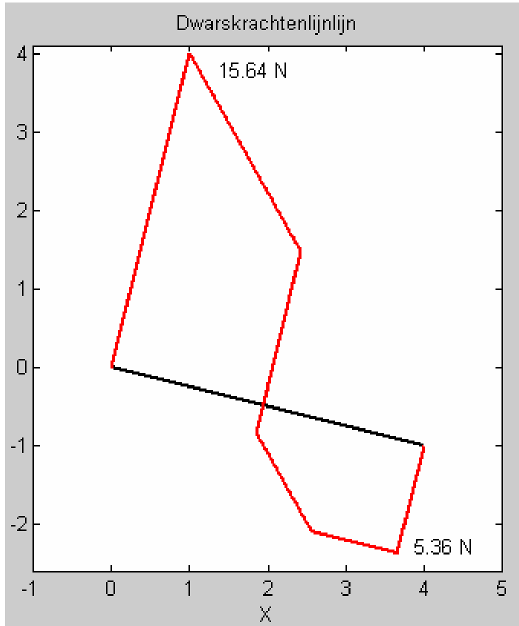
D.7a: Programma



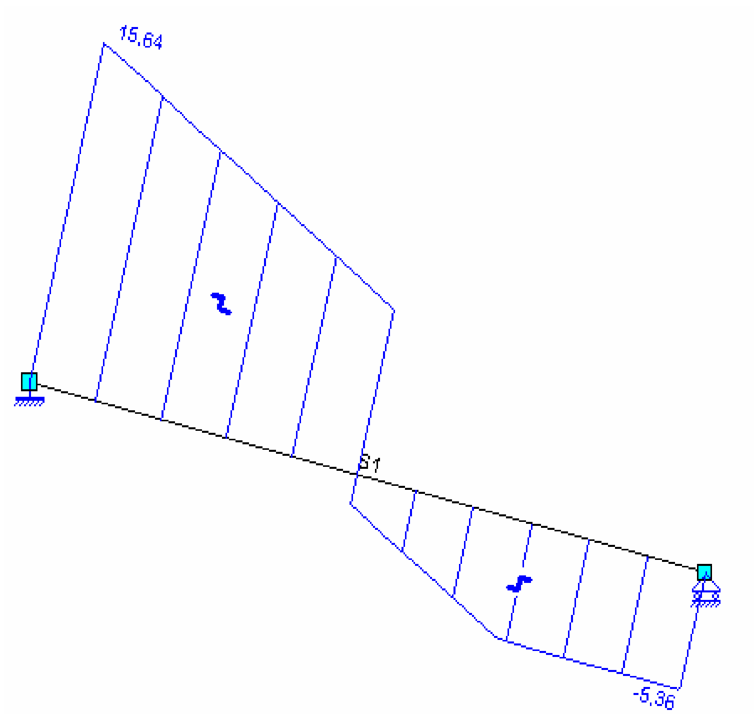
D.7b: MatrixFrame

Figuur D.7: Momentlijnen geplot door het programma en de MatrixFrame

Hier is te zien dat de resultaten voor de geplotte momentlijnen precies hetzelfde zijn.



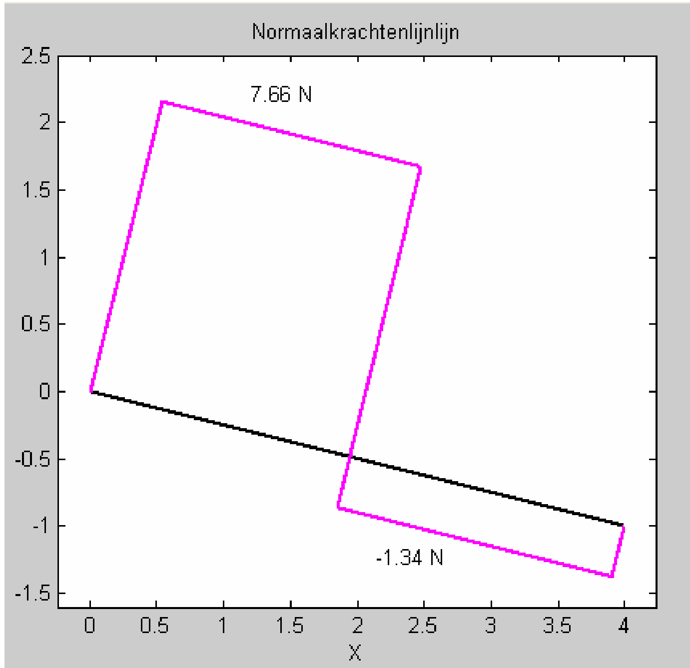
D.8a: Programma



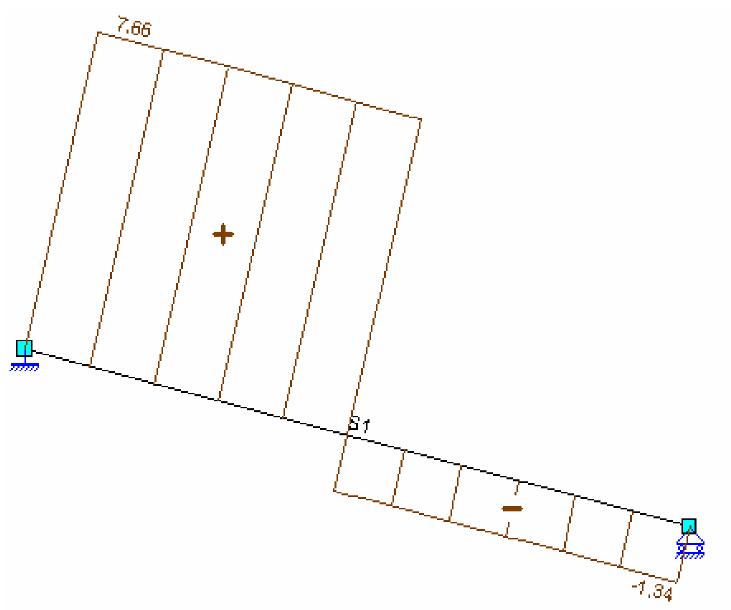
D.8b: MatrixFrame

Figuur D.8: Dwarskrachtlijnen geplot door het programma en de MatrixFrame

Hier is te zien dat de resultaten voor de geplotte dwarskrachtlijnen precies hetzelfde zijn.



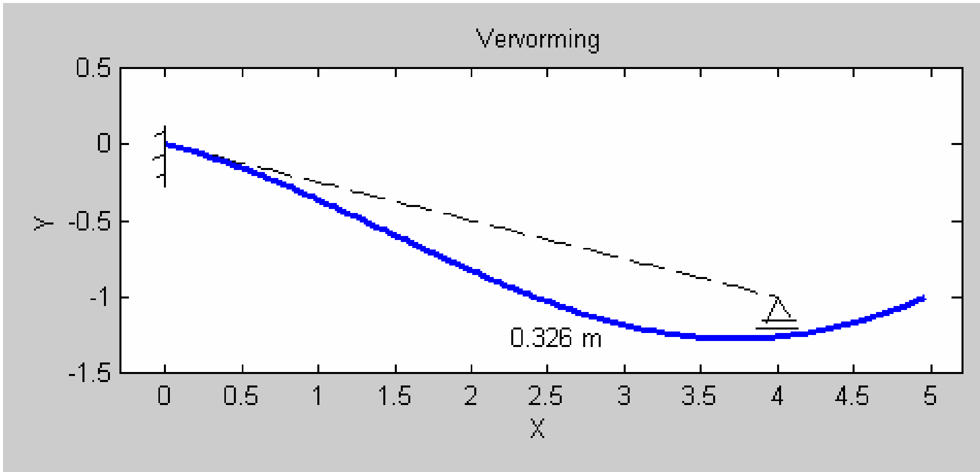
D.9a: Programma



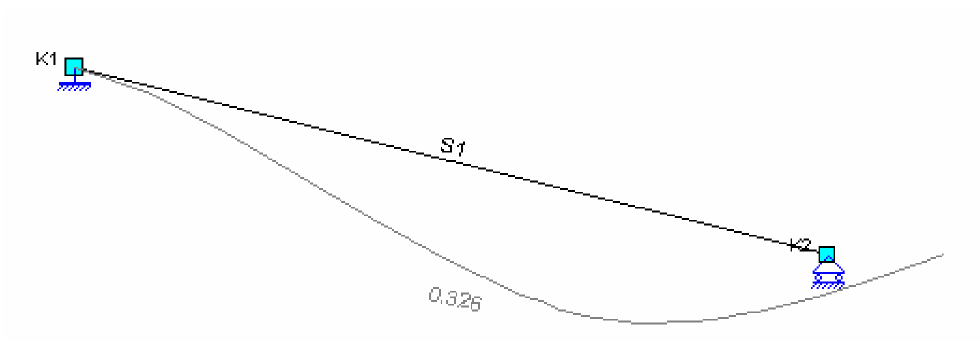
D.9b: MatrixFrame

Figuur D.9: Normaalkrachtlijnen geplot door het programma en de MatrixFrame

Hier is te zien dat de resultaten voor de geplotte normaalkrachtlijnen precies hetzelfde zijn.



*D.10*a: *Programma*



D.10b: MatrixFrame

Figuur D.10: Vervorming van de constructie geplot door het programma en de MatrixFrame

Hier is te zien dat de resultaten voor de geplotte vervorming precies hetzelfde zijn.

Bijlage E. Toetsing van het kruipeffect

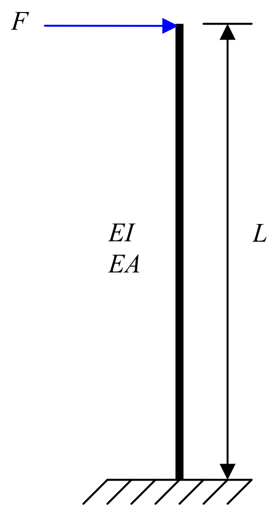
Voorbeeld

Er wordt de constructie, behorende bij de onderstaande gegevens voor het kruipeffect behandeld.

$F = 2000$ N
$L = 4000$ mm
$E = 36000000$ N/mm^2
$I = 976562500$ mm^4
$A = 62500$ mm^2
$O = 2000$ mm

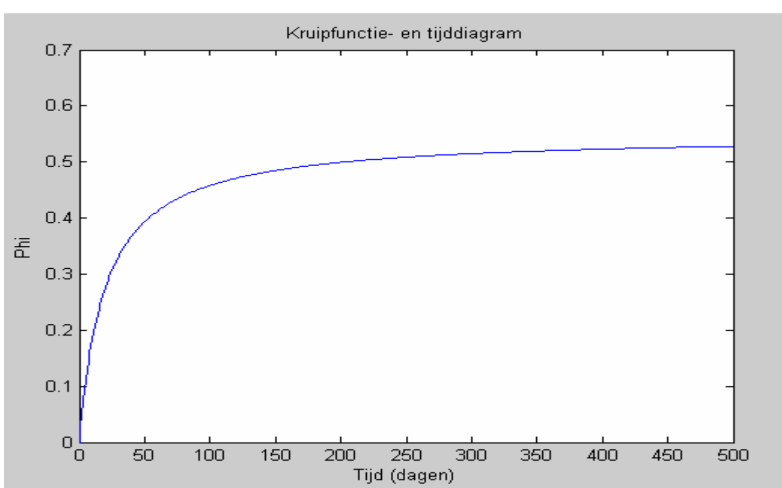
$$h_m = \frac{2 \times A}{O}$$

B55
Zeer vochtig
$\tau_0 = 28$ dagen
$\varphi_{max} = 1{,}3$
$k_c = 1{,}4$
$k_b = 0{,}8$



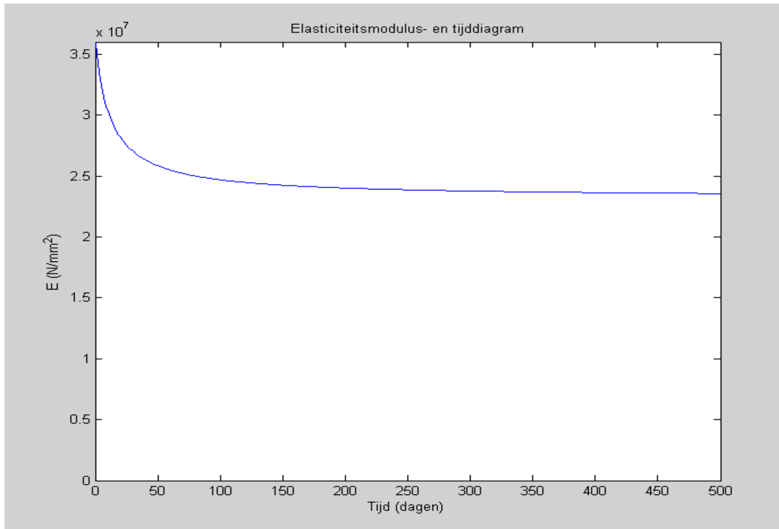
Figuur E.1: Ingeklemd kolom

In figuur E.2 is het kruipfunctie- en tijddiagram gedurende 500 dagen weergegeven. Zoals is te zien wordt de kruipfunctie na 40 dagen minder toegenomen en heeft de kruipfunctie bijna een constante waarde na de 250 dagen.



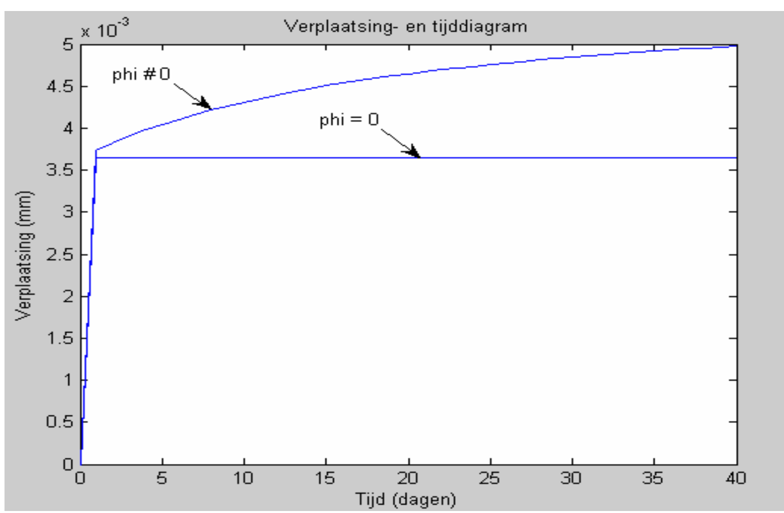
Figuur E.2: kruipfunctie- en tijdiagram

In figuur E.3 is het elasticiteitsmodulus- en tijddiagram weergegeven. Naar verwachting neemt de elasticiteitsmodulus af wanneer de kruipfunctie toeneemt. Dus het programma berekent de elasticiteitsmodulus correct in de loop van de tijd.



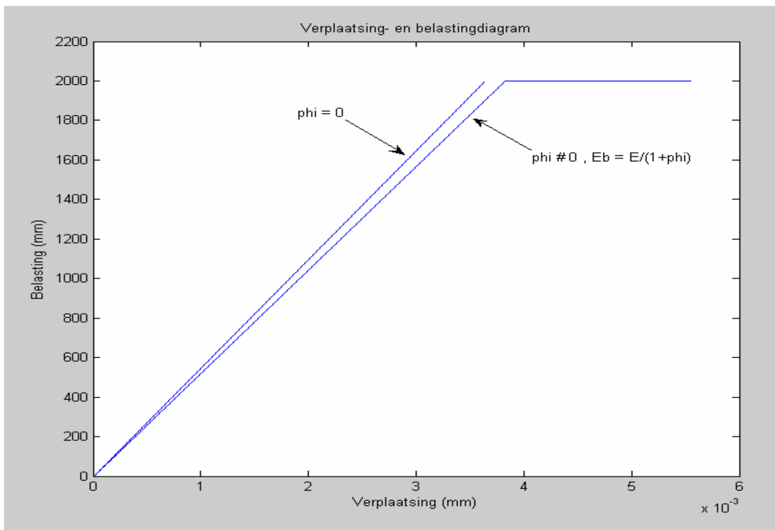
Figuur E.3: Elasticiteitsmodulus- en tijddiagram

In figuur E.4 is het verplaatsing- en tijddiagram gedurende 40 dagen weegegeven. Op constructie is een constante belasting van 2000 N gedurende 1 dag aangebracht. In de figuur E.4 is 2 gevallen te zien. Het eerste geval is het verplaatsing- en tijddiagram zonder invloed van kruip. Het tweede geval is het verplaatsing- en tijddiagram met invloed van kruip. Naar verwachting als de φ waarde nul is dan blijft de verplaatsing ten gevolge van de belasting F constant. Maar als de φ waarde ongelijk aan nul is wordt steeds de elasticiteitsmodules E_b kleiner. En om die reden neemt de verplaatsing in de loop van de tijd ten gevolge van de constante belasting F toe.



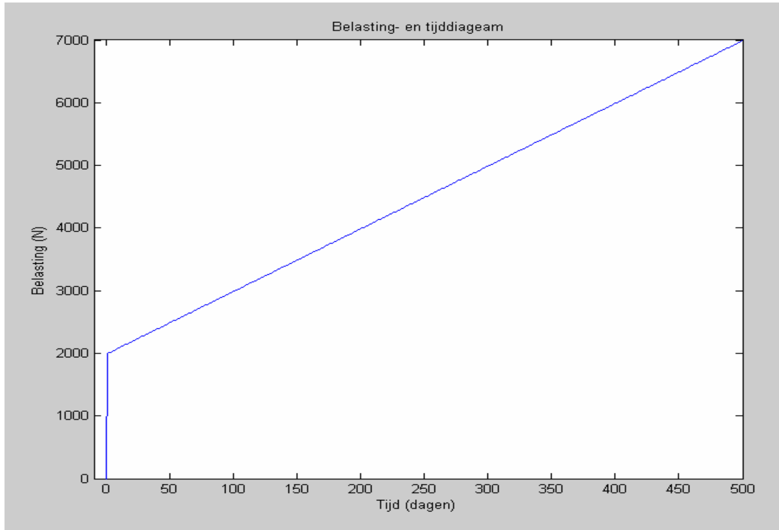
Figuur E.4: Verplaatsing- en tijddiagram

In figuur E.5 is het verplaatsing- en belastingdiagram gedurende 500 dagen weergegeven. Op constructie is een constante belasting van 2000 N gedurende 1 dag aangebracht. Zoals is het te zien als de kruipfunctie φ is gelijk aan nul is de helling van het verplaatsing- en belastingdiagram scherper dan wanneer er op de constructie het kruipeffect beïnvloed. Omdat de kruipfunctie steeds toeneemt en dan neemt elasticiteitsmodulus volgens de formule 7.19 steeds af. In het geval van aanwezigheid van het kruipeffect neemt de verplaatsing na de volmaakte aanbrenging van de belasting na 1 dag steeds toe terwijl in het geval van afwezigheid van het kruipeffect is er geen sprake van de toename van de verplaatsing.

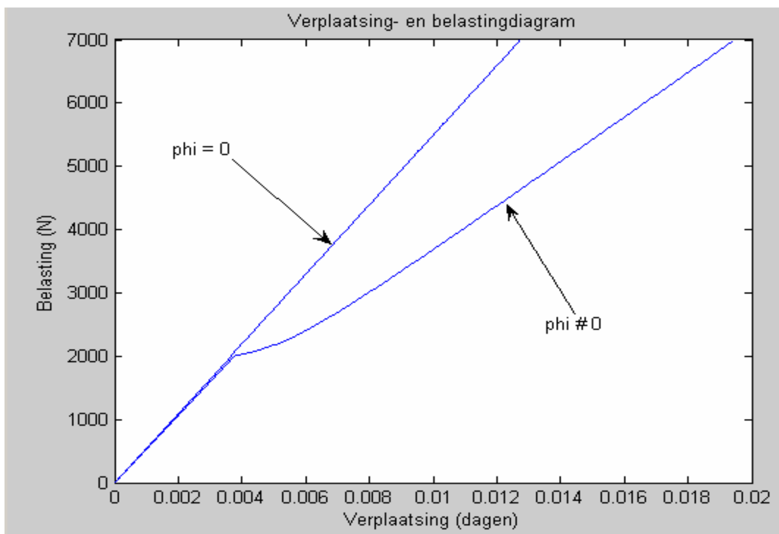


Figuur E.5: Verplaatsing- en belastingdiagram

Verder wordt de constructie met een ander belastinggeval behandeld. Nu neemt de belasting met een waarde ΔF = +10 N gedurende 500 dagen steeds toe. In figuur E.6a en E.6b zijn het belasting- en tijddiagram en het verplaatsing- en belastingdiagram weergegeven. Figuur E.6b beschrijft 2 gevallen. Het eerste geval beschrijft de verhouding tussen belasting en verplaatsing zonder het kruipeffect (φ = 0). Hier is te zien dat de verhouding tussen verplaatsing en belasting gedurende 500 dagen lineair is. Het tweede geval beschrijft de verhouding tussen belasting en verplaatsing met het kruipeffect. Hier is te zien dat na eerste dag de verhouding tussen de verplaatsing en belasting niet lineair is. Dit komt door de verzwakking van de elasticiteitsmodulus ten gevolge van het kruipeffect.

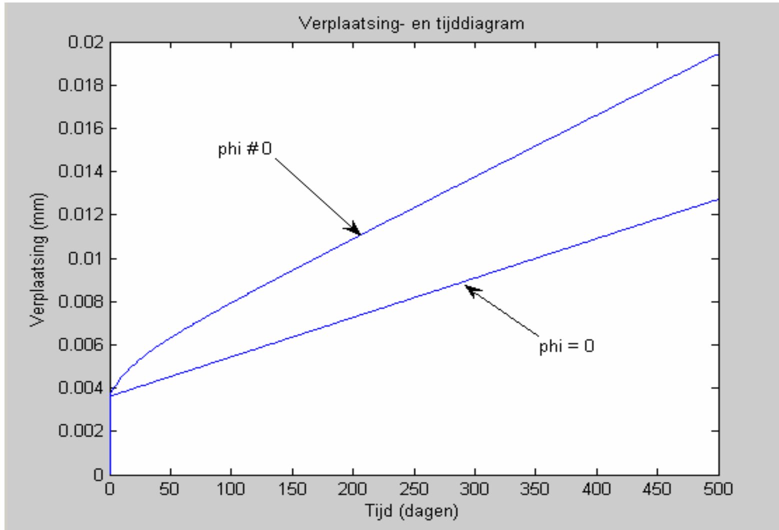


Figuur E.6-a: Belasting- en tijddiagram



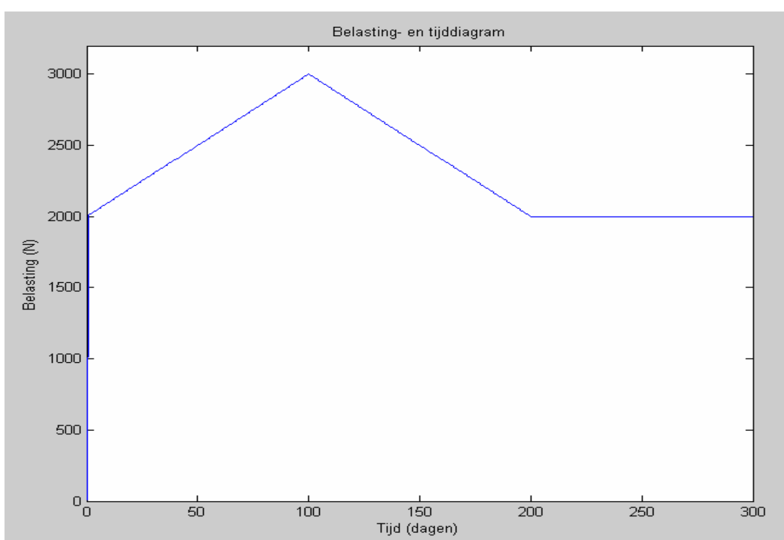
Figuur E.6-b: Belasting- en verplaatsingdiagram

Het is in figuur E.7 verplaatsing- en tijddiagram voor beide gevallen weergegeven. Het is te zien als kruipfunctie nul is neemt verplaatsing lineair na 1 dag steeds toe. Maar als het kruipeffect de constructie beïnvloedt is geen sprake van een lineair verplaatsingverloop tussen 1 en 40 dagen. Op die tijden neemt de kruipfunctie extreem toe, zie ook figuur E.2 en E.3. Na 40 dagen wordt verplaatsingverloop bijna lineair. Omdat de kruipfunctie en elasticiteitsmodulus na 40 dagen bijna constant blijven, zie ook figuur E.2 en E.3.

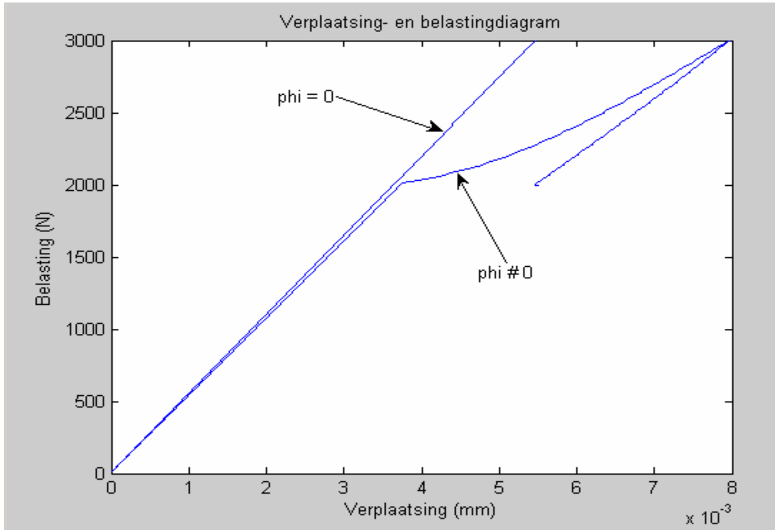


Figuur E.7: verplaatsing- en tijddiagram

Er wordt nog een ander belastinggeval behandeld. Gedurende eerste dag wordt op constructie de belasting F_0 = 2000 N aangebracht. Daarna neemt de belasting met een waarde ΔF = +10 gedurende 100 dagen toe. Vervolgens neemt de belasting met een waarde ΔF = -10 N langzamerhand af gedurende tweede 100 dagen (dus tussen 100 dagen en 200 dagen). Daarna blijft de belastingwaarde F constant, zie ook figuur E.8a. Verder wordt het belasting- en verplaatsingdiagram getekend, zie figuur E.8b. Hier is ook sprake van de tweegevallen. In eerste geval er is geen sprake van het kruipeffect. Daarom als de constructie wordt ontlast komt de verplaatsing met hetzelfde verloop naar de eerste positie terug. Maar in het geval van aanwezigheid van het kruipeffect komt de verplaatsing niet naar dezelfde positie terug. Dit komt door de invloed van de kruip op de constructie. Want de kruipvervorming is onomkeerbaar.

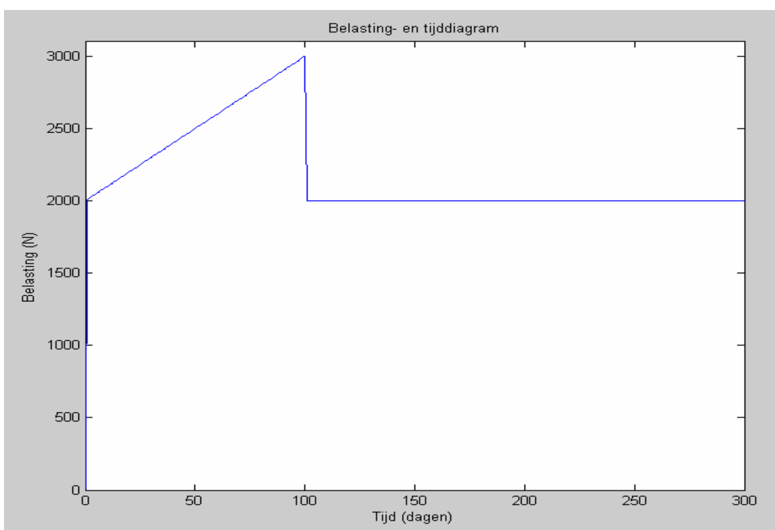


Figuur E.8-a: Belasting- en tijddiagram

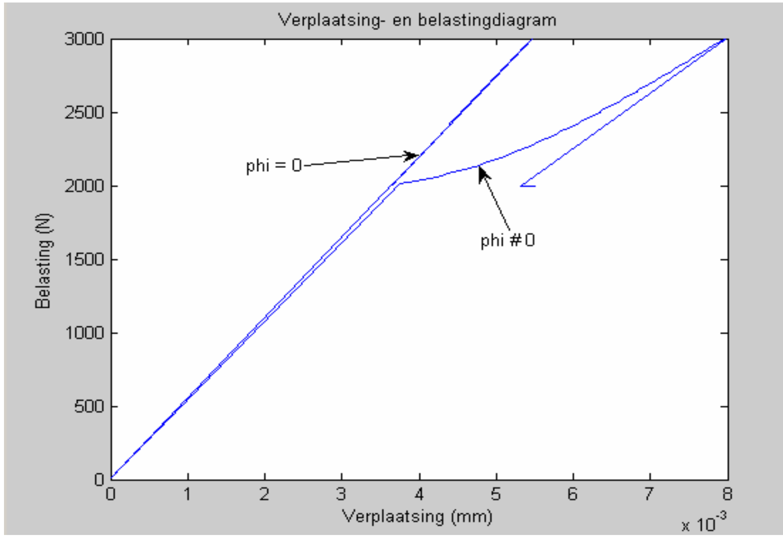


Figuur E.8-b: Belasting- en verplaatsingdiagram

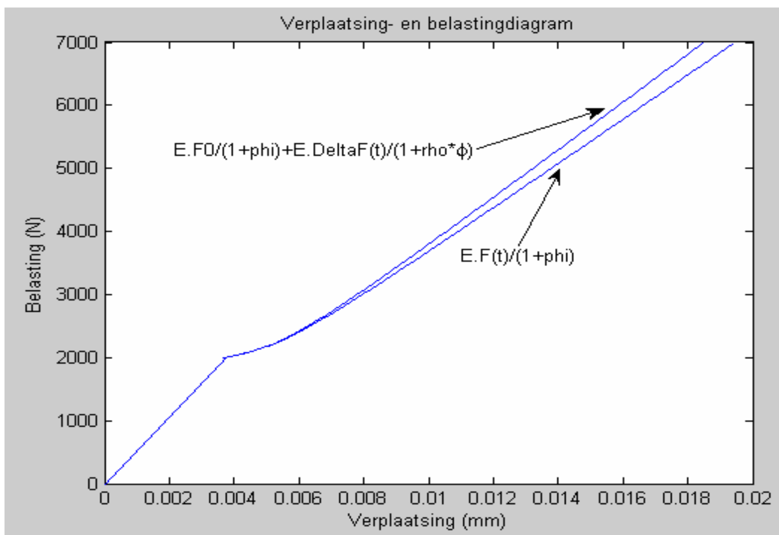
Ten slotte wordt er nog een ander belastingaval bekeken. Gedurende 1 dag wordt de constructie met een belastingwaarde F = 2000 N belast. Daarna neemt de belasting met een waarde ΔF = +10 N gedurende100 dagen toe. Op de honderdste dag wordt de constructie opeens met een waarde 100 × ΔF ontlast totdat F = 2000 N wordt, zie figuur E.9a. In figuur E.9b is tevens het belasting- en verplaatsingdiagram weergegeven. Maar in het geval van aanwezigheid van het kruipeffect komt de verplaatsing niet naar dezelfde positie terug. Dit komt door de invloed van de kruip op de constructie. Want de kruipvervorming is onomkeerbaar.



Figuur E.9-a: Belasting- en tijddiagram



Figuur E.9-b: Belasting- en verplaatsingdiagram



Figuur E.9-c: Belasting- en verplaatsingdiagram

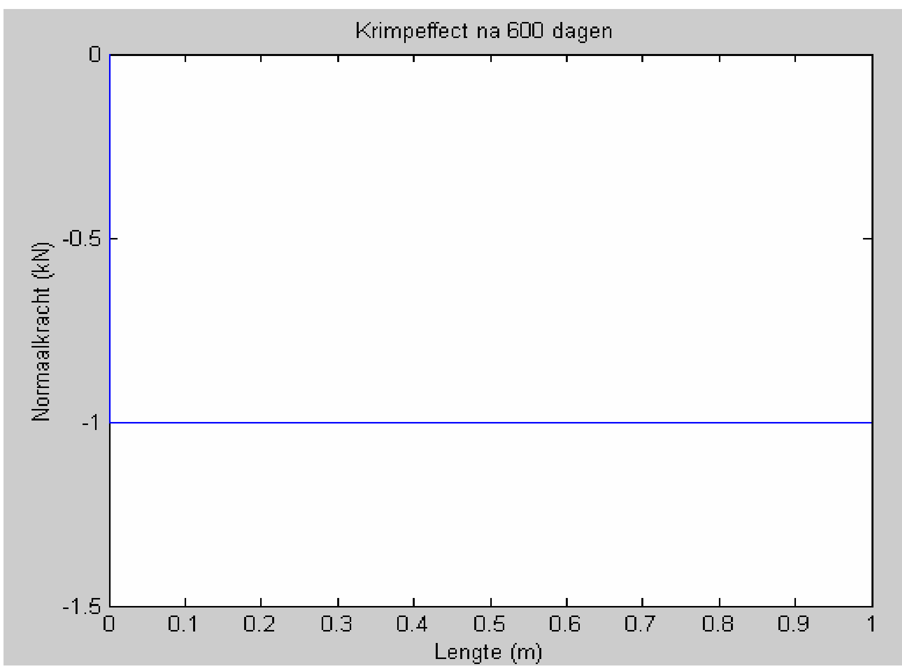
Bijlage F. Toetsing van het krimpeffect

Voorbeeld 1, ligger met vrije vervorming (spanningloos)

Er wordt de ligger in figuur 7.7 als voorbeeld genomen. Voor deze ligger geldt:

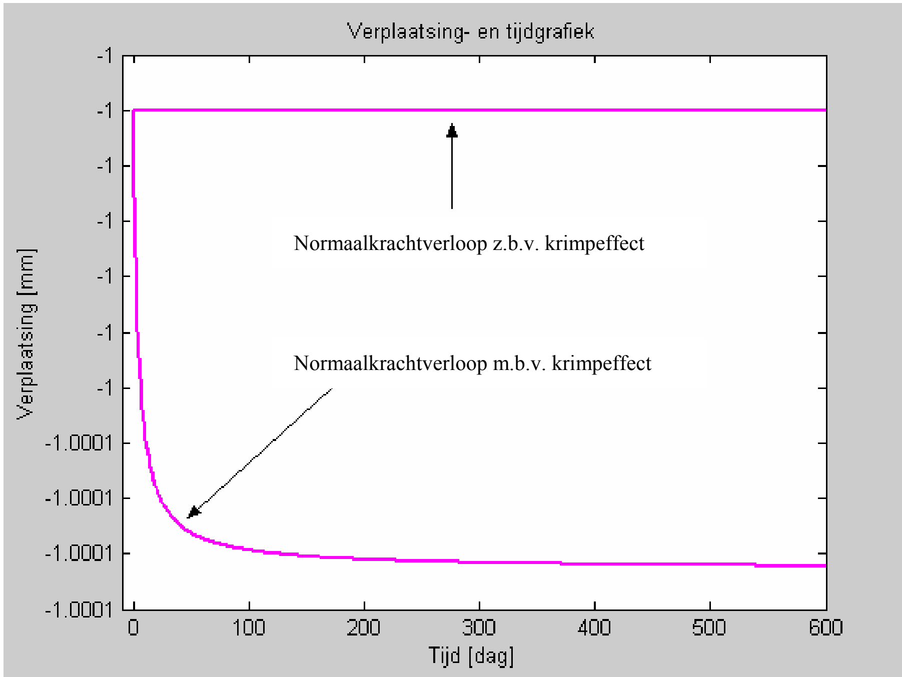
F = 1 kN
EA = 1 kN
L = 1 m
$N + F = 0$
$N\,(t = 0) = -1$

Er wordt voor de ligger verwacht dat er in de loop der tijd geen verandering van de normaalkracht ontstaat terwijl er wel een verkorting ten gevolge van krimp in de lengte van ligger ontstaat. Het resultaten van het programma zijn in figuren F.1 en F.2 weergegeven:



Figuur F.1: Normaalkracht na 600 dagen van constructiebouw

Zoals er wordt verwacht ontstaat er geen verandering van de normaalkracht in de loop van de tijd. Want er wordt de verkorting van de ligger niet verhinderd door de roloplegging bij de knoop 2. Dus de ligger blijft spanningloos ten gevolge van krimpverkorting.



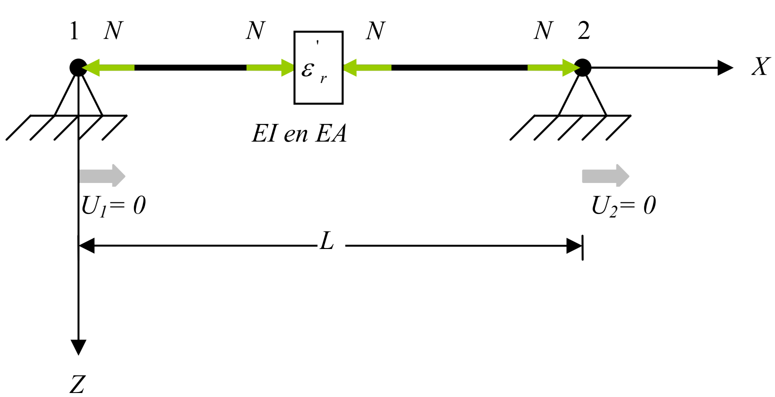
Figuur F.2: Rekverloop in de loop van de tijd.

Maar er ontstaat wel verandering van de rek in de ligger in de loop der tijd. Ten gevolge van krimp ontstaat verkorting in de ligger. Dus de resultaten van het programma komen overeenkomst met de verwachtende resultaten.

Voorbeeld 2, ligger met opgelegde vervorming

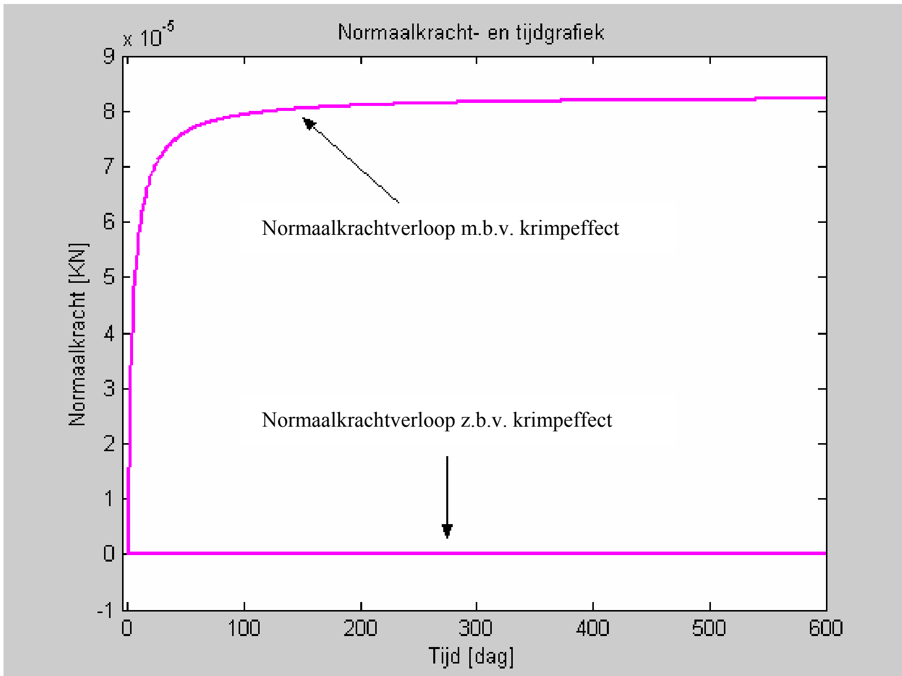
Hier wordt een ligger tussen twee scharnieroplegging (zie figuur F.3) als voorbeeld genomen met:

$EA = 1$ kN
$L = 1$ m
$F = 0$ kN



Figuur F.3: Krimpgedrag

Als de ligger er door krimp wordt verkort wordt er deze verkorting door de opleggingen verhinderd. Er wordt een extra spanning ten gevolge van krimpverkorting in de loop der tijd verwacht. Het resultaten van het programma is in figuren F.4 weergegeven:



Figuur F.4: Normaalkrachten in de tijd = 600 dagen met en zonder beschouwing van krimpeffect

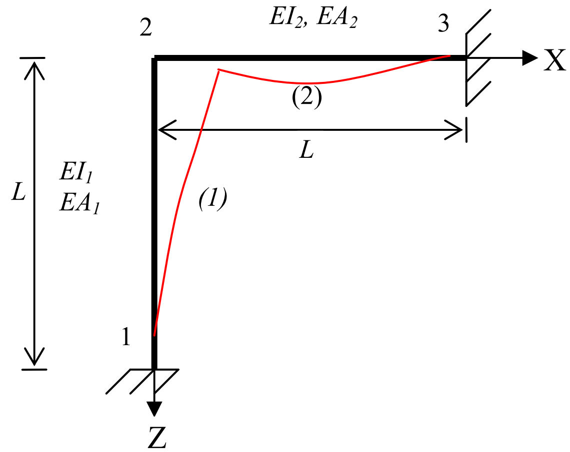
Het is in figuur F.4 te zien dat er een spanning met waarde 0,082 N/ m^2 ten gevolge van krimp in de ligger in loop van de 600 dagen ontstaat. Dit resultaat is al verwacht.

Voorbeeld 3, constructie met opgelegde vervorming

Hier wordt een raamwerk (zie figuur F.5) als voorbeeld genomen met:

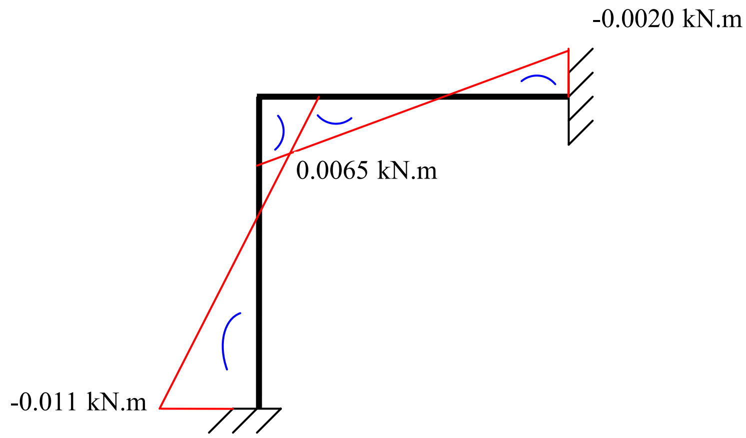
EA_1 = 500 kN
EI_1 = 25 kN.m^2
EA_2 = 25 kN
EI_2 = 25 kN.m^2
L = 1 m
F = 0 kN

Hier wordt verwacht dat er moment en normaalkrachten in de constructie ontstaan ten gevolge van de krimpverkorting. Want de krimpverkorting wordt door knoop 1 en 3 verhinderd. De verwachtende vervorming is in figuur F.5 weergegeven.

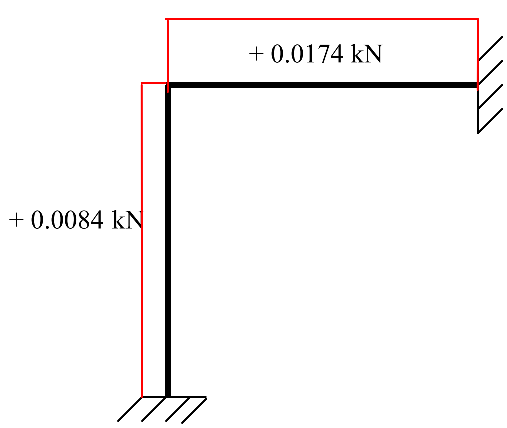


Figuur F.5: Raamwerk met krimpeffect

De momentenlijnen zijn in figuur F.6 weergegeven:



Figuur F.6: Momentenlijn tengevolge van krimpverkorting na 600 dagen



Figuur F.7: Normaalkrachtenlijn tengevolge van krimpverkorting na 600 dagen

Het resultaten van het programma voor dit voorbeeld in de loop van 600 dagen is in tabel F.1 weergegeven.

Nummer van element	Lengte coördinaat	Moment [kN.m]	Normaalkracht [kN]
(1)	0	-0.0110	0.0084
	0.1000	-0.0092	0.0084
	0.2000	-0.0075	0.0084
	0.3000	-0.0057	0.0084
	0.4000	-0.0040	0.0084
	0.5000	-0.0022	0.0084
	0.6000	-0.0005	0.0084
	0.7000	0.0012	0.0084
	0.8000	0.0030	0.0084
	0.9000	0.0047	0.0084
	1.0000	0.0065	0.0084
(2)	0	0.0065	0.0174
	0.1000	0.0056	0.0174
	0.2000	0.0048	0.0174
	0.3000	0.0039	0.0174
	0.4000	0.0031	0.0174
	0.5000	0.0022	0.0174
	0.6000	0.0014	0.0174
	0.7000	0.0006	0.0174
	0.8000	-0.0003	0.0174
	0.9000	-0.0011	0.0174
	1.0000	-0.0020	0.0174

Tabel F.1: Normaalkrachten en momenten van de constructie ten gevolge van krimp na 600 dagen

U_{2x} = +0.1030 e-003
U_{2z} = -0.0169 e-003
Φ_{2y} = -0.0899 e-003

Uit figuur F.6 en F.7 is te zien dat momentlijnen en normaalklachtenlijnen uit programma komen overeen met de verwachtende vervorming van constructie uit figuur F.5.

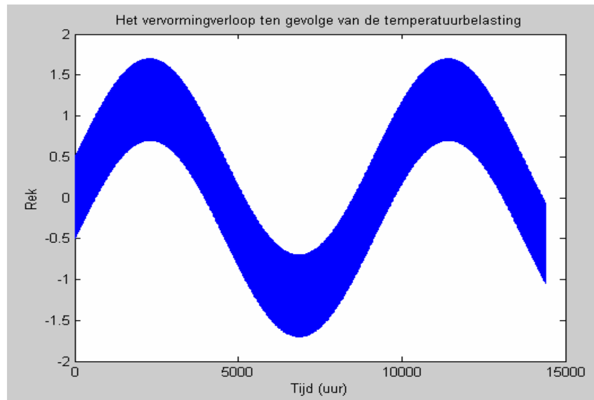
Bijlage G. Toetsing van het temperatuureffect

Voorbeeld 1, ligger met vrije vervorming (spanningloos)

Er wordt de ligger in figuur 8.5 als voorbeeld genomen. Voor deze ligger geldt:

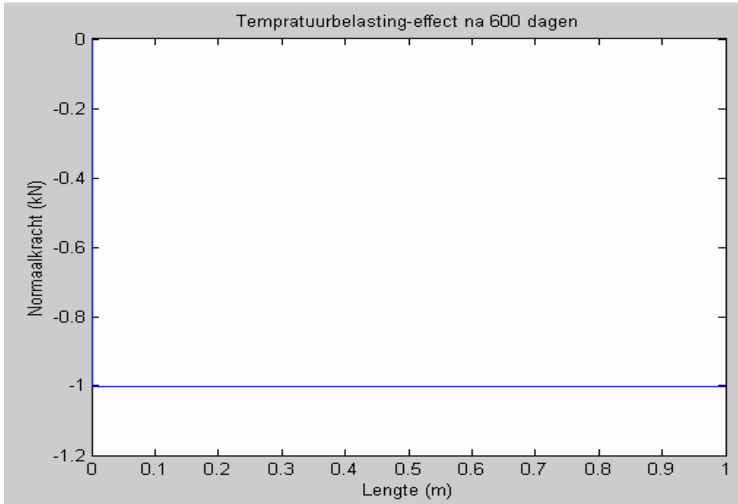
F = 1 kN
EA = 1 kN
L = 1 m
F = 1 kN
N (t=0) = -1 kN
$\alpha_c = 1.10^{-2}$ m/m.^{o}c
$\Delta T_{dagmax} = +5^o$c
$\Delta T_{jaarmax} = +12^o$c
Tijd = 600 dagen

Dus hier is sprake van verkorting in de ligger ten gevolge van temperatuurinvloed.



Figuur G.1: Vervormingverloop t.g.v. temperatuurinvloed na 600 dagen

Er wordt voor de ligger verwacht dat er in de loop der tijd geen verandering van de normaalkracht ontstaat terwijl er wel een verlenging ten gevolge van temperatuurinvloed in de lengte van ligger ontstaat. Het resultaten van het programma zijn in figuren G.2 weergegeven.
Zoals er wordt verwacht ontstaat er geen verandering van de normaalkracht in de loop van de tijd. Want er wordt de verlenging van de ligger niet verhinderd door de roloplegging bij de knoop 2. Dus de ligger blijft spanningloos ten gevolge van temperatuurinvloed. Maar er ontstaat wel verandering van de rek in de ligger in de loop der tijd. Ten gevolge van temperatuurinvloed ontstaat verlenging in de ligger. Dus de resultaten van het programma komen overeenkomst met de verwachtende resultaten.



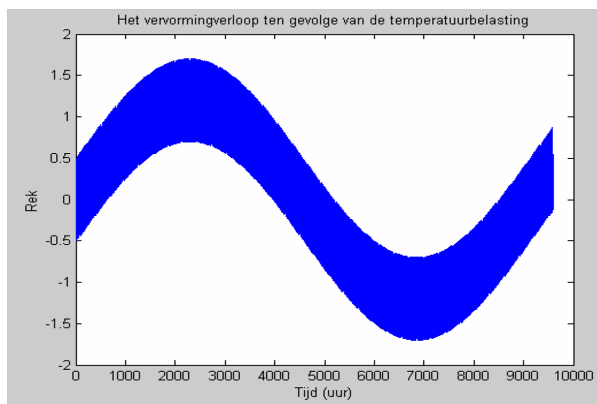
Figuur G.2: Normaalkracht na 600 dagen van constructiebouw

Voorbeeld 2, ligger met opgelegde vervorming

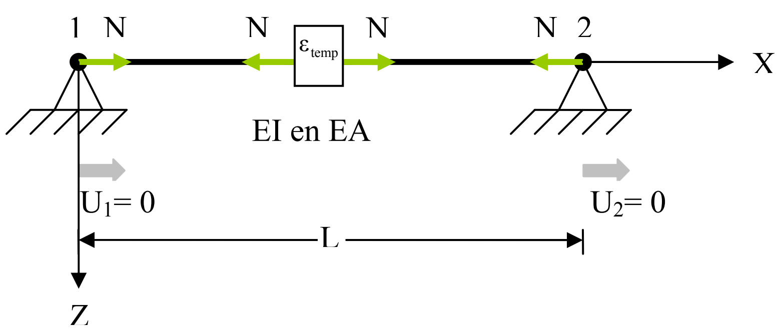
Hier wordt een ligger tussen twee scharnieroplegging (zie figuur G.4) als voorbeeld genomen met:

EA = 1 kN
L = 1 m
F = 0 kN
$\alpha_c = 1.10^{-2}$ m/m.^{o}c
$\Delta T_{dagmax} = +5\ ^o$c
$\Delta T_{jaarmax} = +12\ ^o$c
$Tijd$ = 400 dagen

Dus hier is sprake van verlenging in de ligger ten gevolge van temperatuurinvloed.

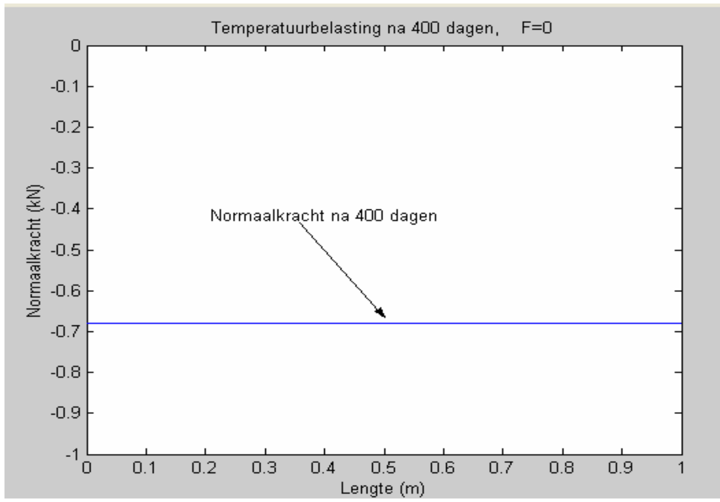


Figuur G.3: Vervormingverloop t.g.v. temperatuurinvloed na 400 dagen



Figuur G.4: Temperatuurbelasting

Als de ligger er door temperatuurinvloed wordt verlengd wordt er deze verlenging door de opleggingen verhinderd. Er wordt een extra spanning ten gevolge van temperatuurinvloed in de loop der tijd verwacht. Het resultaten van het programma is in figuren G.5 weergegeven:



Figuur G.5: Normaalkrachten, tijd = 400 dagen

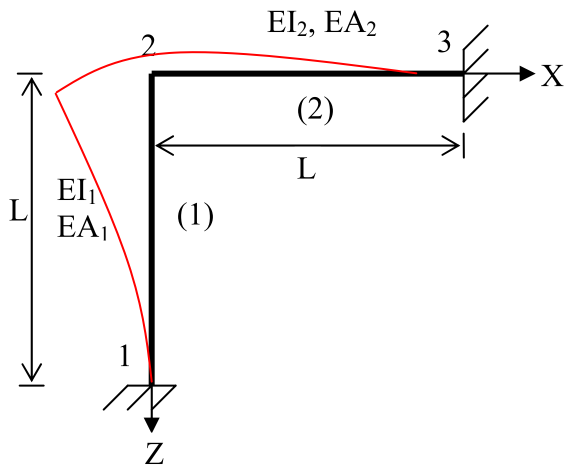
Het is in figuur G.5 te zien dat er een drukspanning met waarde -0.6800 kN/ m^2 ten gevolge van temperatuurinvloed in de ligger in loop van de 400 dagen ontstaat. Dit resultaat is al verwacht.

Voorbeeld 3, constructie met opgelegde vervorming

Hier wordt een raamwerk (zie figuur G.6) als voorbeeld genomen met:

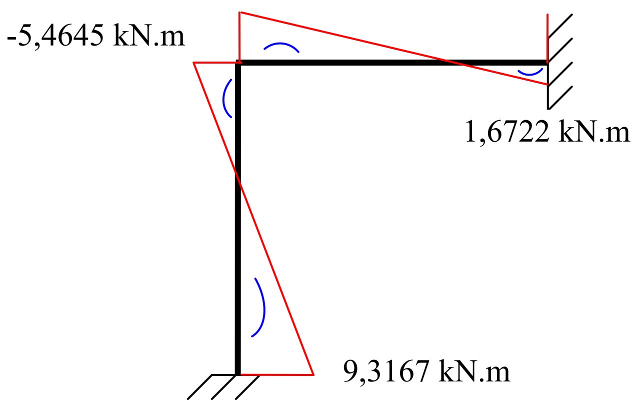
EA_1 = 500 kN
EI_1 = 25 kN.m^2
EA_2 = 25 kN
EI_2 = 25 kN.m^2
L = 1 m
F = 0 kN
$\alpha_c = 1.10^{-2}$ m/m.^{o}c
ΔT_{dagmax} = +5 ^{o}c
$\Delta T_{jaarmax}$ = +12 ^{o}c
Tijd = 400 dagen

Dus hier is ook sprake van verlenging ten gevolge van temperatuurinvloed. Hier wordt verwacht dat er moment en normaalkrachten in de constructie ontstaan ten gevolge van de temperatuurinvloed. Want de verlenging ten gevolge van temperatuurbelasting wordt door knoop 1 en 3 verhinderd. De verwachtende vervorming is in figuur G.6 weergegeven.

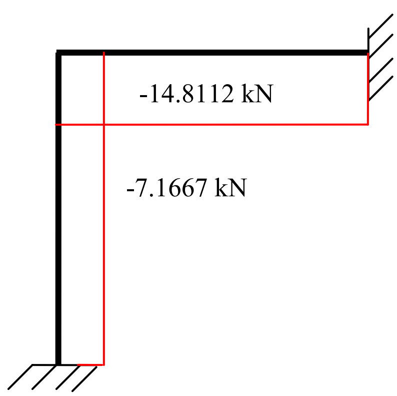


Figuur G.6: Raamwerk met temperatuurinvloed

De momentenlijn is in figuur G.7 weergegeven:



Figuur G.7: Momentenlijn tengevolge van temperatuurinvloed na 400 dagen



Figuur G.8: Normaalkrachtlijnen tengevolge van temperatuurinvloed na 400 dagen

Het resultaten van het programma voor dit voorbeeld in de loop van 400 dagen is in tabel G.1 weergegeven.

Nummer van element	Lengte coördinaat	Moment [kN.m]	Normaalkracht [kN]
(1)	0	9.3167	-7.1667
	0.1000	7.8356	-7.1667
	0.2000	6.3545	-7.1667
	0.3000	4.8734	-7.1667
	0.4000	3.3922	-7.1667
	0.5000	1.9111	-7.1667
	0.6000	0.4300	-7.1667
	0.7000	-1.0511	-7.1667
	0.8000	-2.5322	-7.1667
	0.9000	-4.0134	-7.1667
	1.0000	-5.4945	-7.1667
(2)	0	-5.4945	-14.8112
	0.1000	-4.7778	-14.8112
	0.2000	-4.0611	--14.8112
	0.3000	-3.3445	-14.8112
	0.4000	-2.6278	-14.8112
	0.5000	-1.9111	-14.8112
	0.6000	-1.1945	-14.8112
	0.7000	-0.4778	-14.8112
	0.8000	0.2389	-14.8112
	0.9000	0.9556	-14.8112
	1.0000	1.6722	-14.8112

Tabel G.1: Normaalkrachten en momenten van de constructie ten gevolge van krimp na 400 dagen.

Uit figuur G.7 en G.8 is te zien dat momentlijnen en normaalklachtenlijnen uit programma komen overeen met de verwachtende vervorming van constructie uit figuur G.6.

Bijlage H. Eerste toetsmodel

Inleiding

Met het gemaakte programma kunnen er raamwerken met lineair en niet-lineaire veren, viskeuze-elementen voor het modelleren van het kruip en relaxatiegedrag, krimp- en temperatuurinvloeden worden behandeld. In dit hoofdstuk wordt een raamwerk als een model van een hoofddeel van een trestle brug behandeld. In dit hoofdstuk zijn de afmetingen en grootheden nog niet volledig realistisch. Het is de bedoeling dat eerst een eenvoudig model van de brug met de benodigde elementen- en belastingtypen wordt gemaakt. Daarna wordt in stappen een realistisch model met alle benodigde elementen- en belastingen en de realistische afmetingen en grootheden ontwikkeld. Het eerste model bestaat uit drie liggers met vier palen. Elke paal wordt in kleinere elementen opgedeeld. Hier worden de verkeer- en golfbelasting, slijtlaag en eigengewicht van liggers op aangebracht. De krimp- en temperatuurinvloeden worden hier in beschouwing genomen. In dit hoofdstuk wordt tevens de afstand tussen veren verfijnd om het model te toetsen. Ten slotte wordt de berekeningen van de afmetingen van liggers en belastingen op deze liggers behandeld.

Hoofddeel van de trestle brug

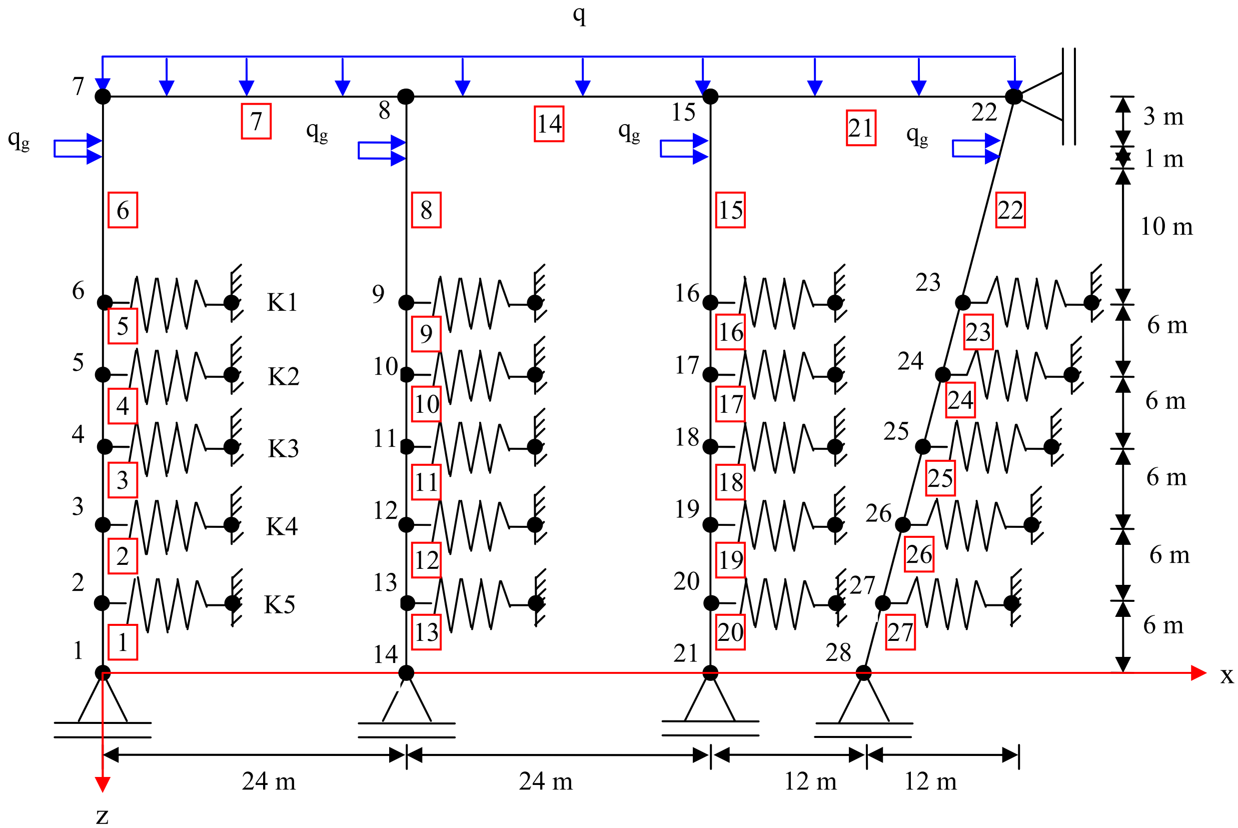
Het eerste model bestaat uit drie liggers en vier palen die in zes elementen opgedeeld worden. Het bovenste paalelement is 14 meter en de resterende paalelementen 6 meter. In elke paal wordt 5 veerelement met veerafstanden van 6 meter aangebracht, zoals in figuur H.1 is weergegeven. Er wordt van veerelementen gebruik gemaakt voor het modelleren van de interactie tussen de palen en de grondlagen. Door symmetrie te gebruiken mag alleen half van het hoofddeel gemodelleerd worden. Alle verbindingen tussen staven zijn momentvast in dit model.

De liggers zijn allemaal voorspanliggers met de onderstaande gegevens:

Ec = 3,6×10^4 kN/m
Ic = 0,3686 m^4
Ac = 0,3727 m^2
Sterkteklasse = B55

De palen zijn allemaal stalen buispalen met de onderstaande gegevens:

Es = 2,1×10^5 kN/m
Is = 0,00551 m^4
As = 0,0557 m^2



Figuur H.1: Model van het raamwerk

Op de liggers worden de belasting q die bestaat uit de verkeerbelasting, het eigengewicht van liggers en het gewicht van de slijtlaag aangebracht. Daarnaast wordt op de palen de belasting q_g ten gevolge van de golfbelasting aangebracht. Voor de golfbelasting q_g is er verondersteld van een gelijkmatige belasting op de bovenste rij van elementen met de waarde 50 kN/m, zoals in figuur H.1 is weergegeven.
De waarde van de q en de q_g zijn:

q =37,05 kN/m
q_g = 50 kN/m

Om de veerstijfheden te berekenen zijn van onderstaande formules gebruikt gemaakt:

$$E_{soil} = 150000\frac{(2{,}17-e)^2}{(1+e)}\left(\frac{p'}{p_{atm}}\right)^{0{,}5}\left(\frac{0{,}0001}{\gamma}\right)^{0{,}4} \quad [\text{kN/m}^2]$$

$$\delta = \Delta T.\alpha.L/2 \text{ [m]}$$

$$\gamma = \frac{2\delta}{2H}$$

$$\mathrm{K}_{\text{horizontaal}} = \frac{4.Es/\pi}{(L/H)^{0,6}} \ [\mathrm{kN/m/m^2}]$$

$$\mathrm{n_h} = \text{eenheidsbeddingconstante } [\mathrm{kN/m^3}]$$

$$\mathrm{K}_{\text{horizontaal}} = \mathrm{n_h}.\mathrm{y/d_{paal}} \ \text{ en Kveer} = \mathrm{K}_{\text{horizontaal}}.\text{Oppervlak}_{\text{veer}}$$

Voor slappe grondlagen gelden:

K1 = 4500 kN/m
K2 = 20250 kN/m
K3 = 31500 kN/m
K4 = 43750 kN/m
K5 = 54000 kN/m

Om krimp van de liggers te berekenen is aangehouden:

$$\varepsilon'_c = 0,1 \ \ zeer\ vochtig$$

$$k_b = 0,8$$

$$\varepsilon'_{\max} = 0,0008$$

$$Wapeningpercentage = 0,03$$

$$\varepsilon'_r = \varepsilon'_c \cdot k_b \cdot k_h \cdot k_p \cdot k_t \leq \varepsilon'_{\max}$$

Om temperatuurinvloeden van de liggers te berekenen geldt:

$$\alpha = 8,6 \times 10^{-6}$$

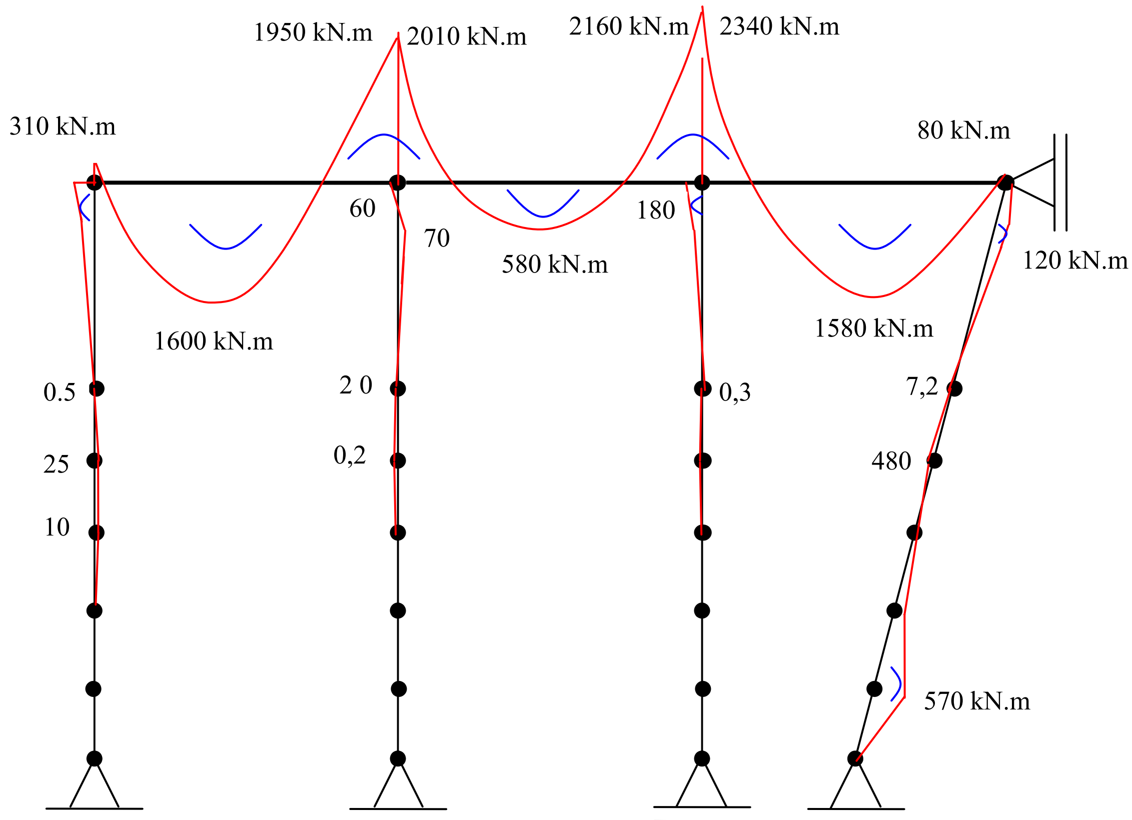
$$Dagelijkse\ \Delta T_{\max} = 5^o c$$

$$Jaarlijkse\ \Delta T_{\max} = 12^o c$$

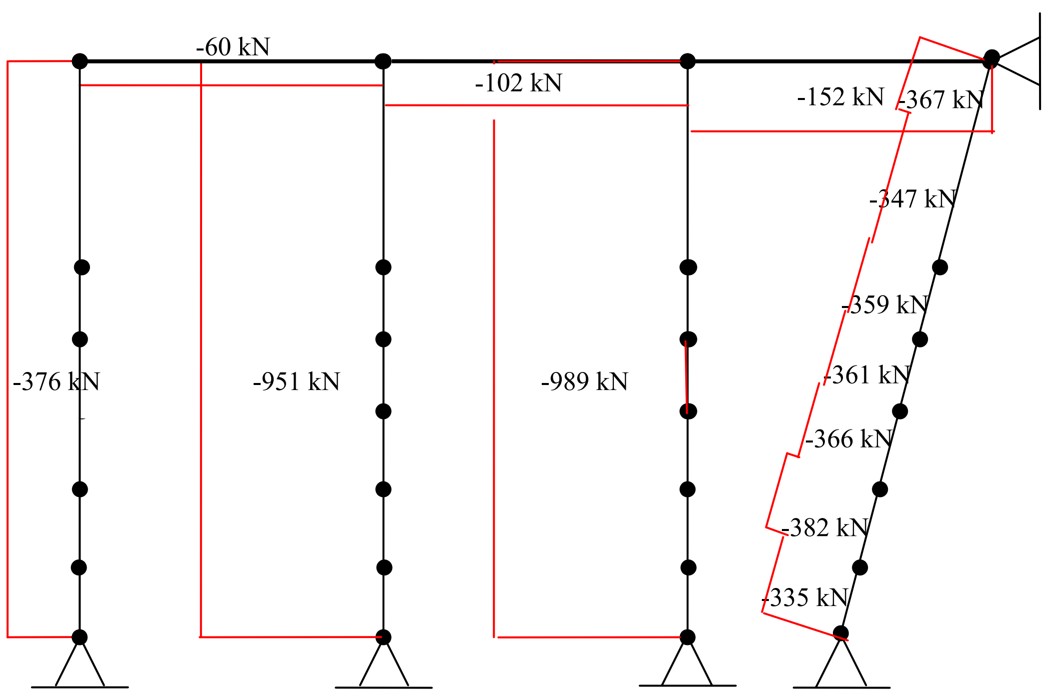
$$\Delta T = \sin(2\pi.\frac{uur}{24}) \times \Delta T_{dag\max} + \sin(2\pi.\frac{dag}{365}) \times \Delta T_{jaar\max}$$

Model zonder krimp- en temperatuurinvloed

De normaalkrachten en de momenten van de constructie met de bovengenoemde belastingen in de begintijd = 0 uur zijn door het programma berekend.



Figuur H.2: Momentenlijn, tijd = 0 uur



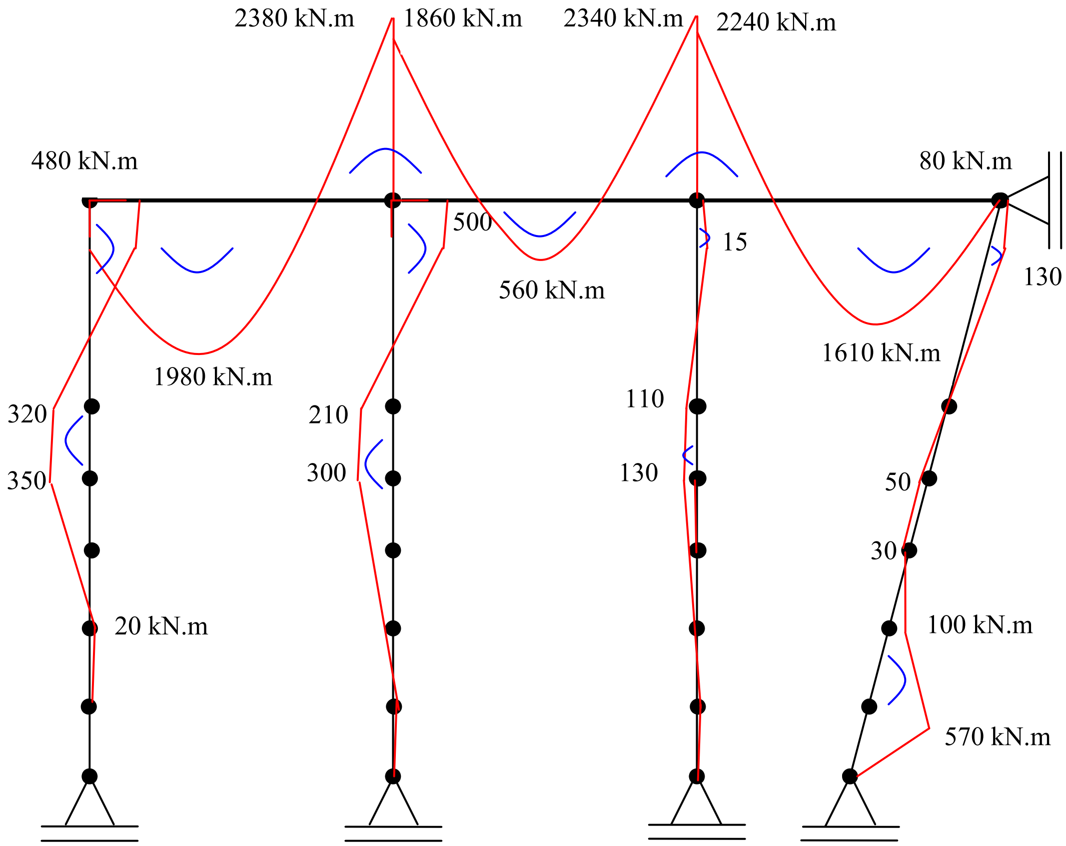
Figuur H.3: Normaalkrachtenlijn, tijd = 0 uur

De horizontale verplaatsingen van de opleggingen en beide uiteinden van de liggers zijn als volgt:

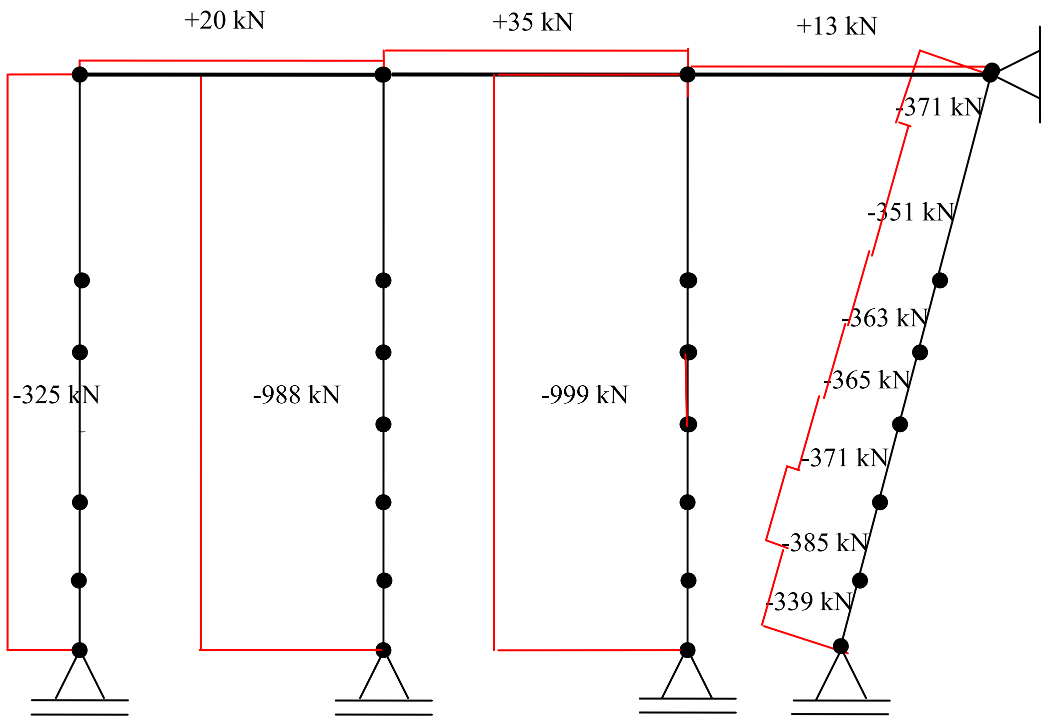
$U1x$ = -3,8029e-005 m
$U7x$ = 5,6088e-004 m
$U8x$ = 4,5407e-004 m
$U14x$ = 3,3001e-005 m
$U15x$ = 2,7237e-004 m
$U21x$ = -2,9082e-006 m
$U22x$ = 0
$U28x$ = -0,0205 m

Model zonder temperatuurinvloed

Er wordt normaalkrachten en momenten van de constructie met alle benoemde belastingen behalve temperatuurbelasting in het tijdstip = 100 dagen berekend. De resultaten zijn in figuren H.4 en H.5 weergegeven.



Figuur H.4: Momentenlijn, tijd = 100 dagen



Figuur H.5: Normaalkrachtenlijn, tijd = 100 dagen

De horizontale verplaatsingen van de opleggingen en beide uiteinden van de liggers zijn als volgt:

$U1x$ = 4,7526e-004 m
$U7x$ = 0,0575 m
$U8x$ = 0,0383 m
$U14x$ = 3,8745e-004 m
$U15x$ = 0,0192 m
$U21x$ = 1,7139e-004 m
$U22x$ = 0
$U28x$ = -0,0207 m

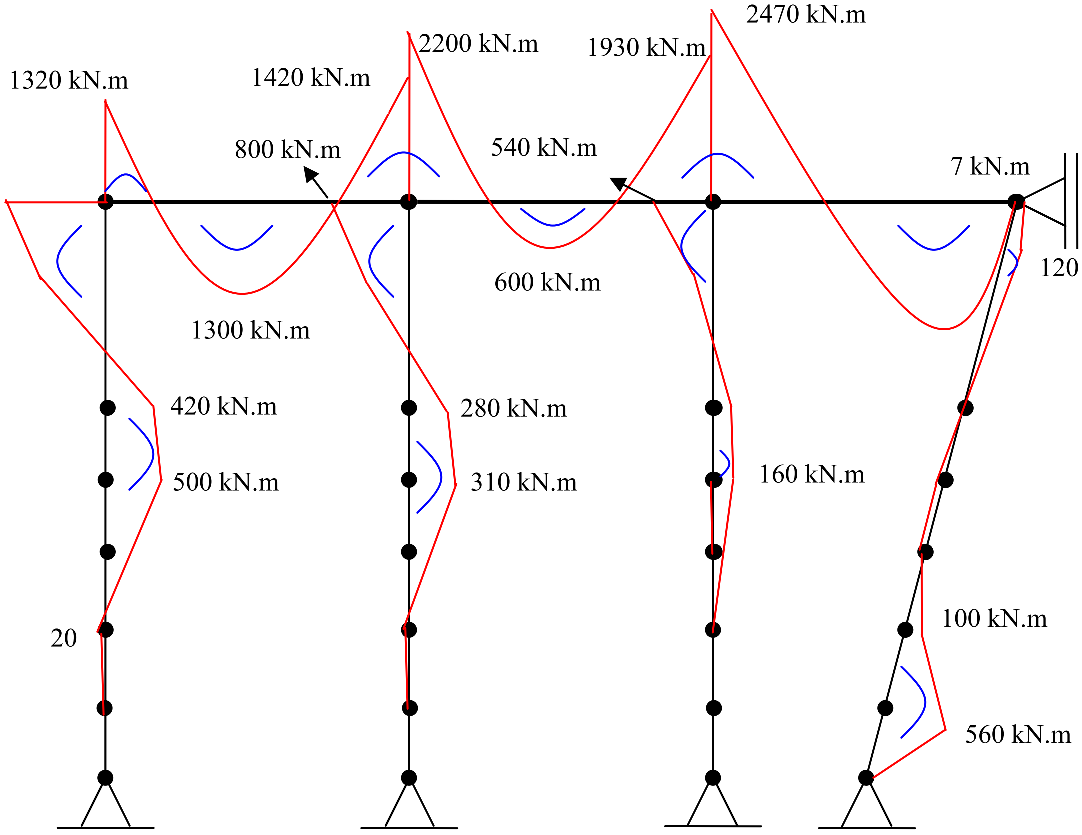
Naar verwachting veroorzaakt de krimpinvloeden de trekkracht in de liggers. De horizontale verplaatsing van de knopen 7, 8 en 15 zijn naar verwachting in de positieve *x*-richting.

Model zonder krimpinvloed

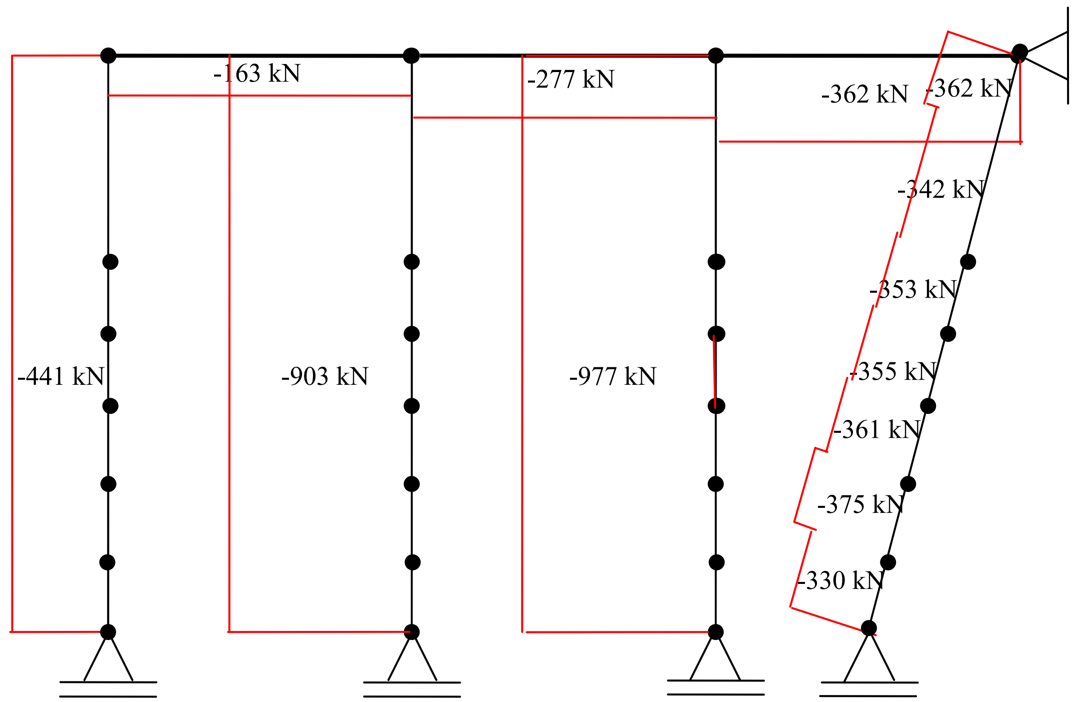
Er wordt normaalkrachten en momenten van de constructie met alle benoemde belastingen behalve krimpeffect in het tijdstip = 100 dagen berekend. De resultaten zijn in figuren H.6 en H.7 weergegeven. De horizontale verplaatsingen van de opleggingen en beide uiteinden van de liggers zijn als volgt:

$U1x$ = -6,9268e-004 m

$U7x$ = -0,0720 m
$U8x$ = -0,0478 m
$U14x$ = -4,1906e-004 m
$U15x$ = -0,0238 m
$U21x$ = -2,2520e-004 m
$U22x$ = 0
$U28x$ = -0,0202 m



Figuur H.6: Momentenlijn, tijd = 100 dagen

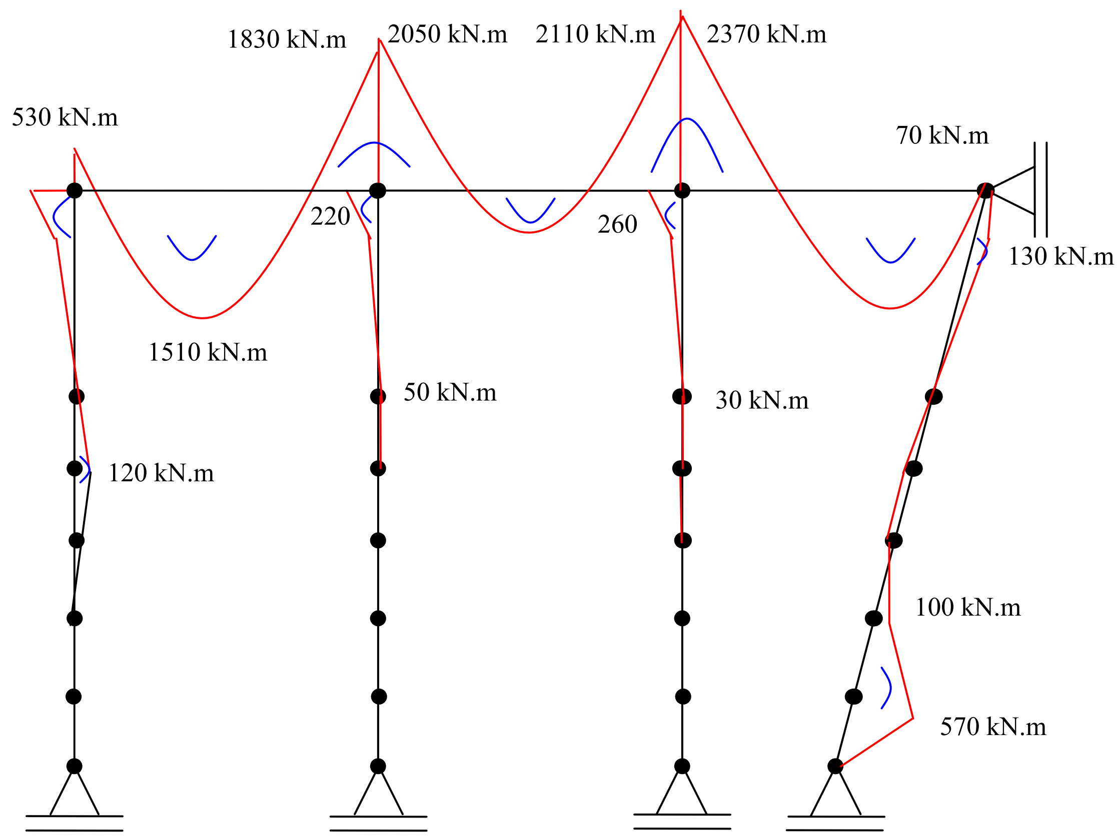


Figuur H.7: Normaalkrachtenlijn, tijd = 100 dagen

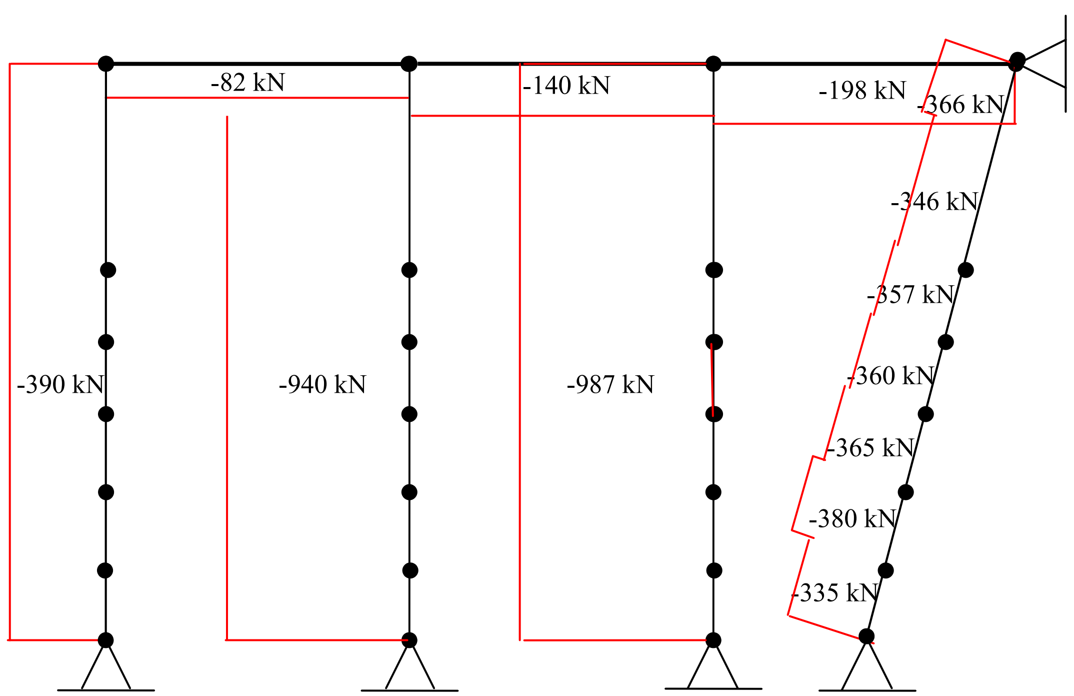
Naar verwachting veroorzaakt de temperatuurinvloeden drukkracht in de liggers op dit tijdstip. De horizontale verplaatsing van de knopen 7, 8 en15 zijn naar verwachting in de negatieve *x*-richting.

Model met krimp- en temperatuurinvloed

Er wordt normaalkrachten en momenten van de constructie met alle benoemde belastingen in het tijdstip = 100 dagen berekend. De resultaten zijn in figuren 9.8 en 9.9 weergegeven.



Figuur H.8: Momentenlijn, tijd = 100 dagen



Figuur H.9: Normaalkrachtenlijn, tijd = 100 dagen

De horizontale verplaatsingen van de opleggingen en beide uiteinden van de liggers zijn als volgt:

$U1x$ = -1,7939e-004 m
$U7x$ = -0,0151 m
$U8x$ = -0,0100 m
$U14x$ = -6,4613e-005 m
$U15x$ = -0,0049 m
$U21x$ = -5,0908e-005 m
$U22x$ = 0
$U28x$ = -0,0204 m

Naar verwachting veroorzaakt krimp- en temperatuurinvloed respectievelijk trek- en drukkracht in de liggers op dit tijdstip die door elkaar worden gecompenseerd. Hier is de temperatuurinvloed groter dan krimpinvloed. Dus de horizontale verplaatsingen van de knopen 7, 8 en 15 dient in de negatieve x-richting te zijn. Dit is in de uitkomsten van het programma te zien.

Verfijning van de veerafstanden

De veerelementen modelleren de interactie tussen palen en grond te worden gemodelleerd. De afstand tussen veren mag geen invloed hebben op de resultaten. Dus de veerafstanden voldoende klein zijn. Hiervoor wordt een raamwerk als figuur H.10 beschouwd. De krimp- en temperatuurinvloeden zijn buiten beschouwing gelaten. De afstand tussen de veren en ook de veerstijfheid van elke veer worden gehalveerd. Dat betekent dat het nieuwe raamwerk in plaats van 5 veren 10 veren heeft met de afstand 3 m. Als de nieuwe momentlijn geen of heel weinig verschil geeft dan is de veerafstanden van figuur H.10 acceptabel. Als het niet van geval is dient dit proces te worden herhaald totdat twee achtereenvolgende momentenlijnen bijna gelijk zijn. Met behulp van drie voorbeelden wordt hier de verticale veerafstanden verfijnd.

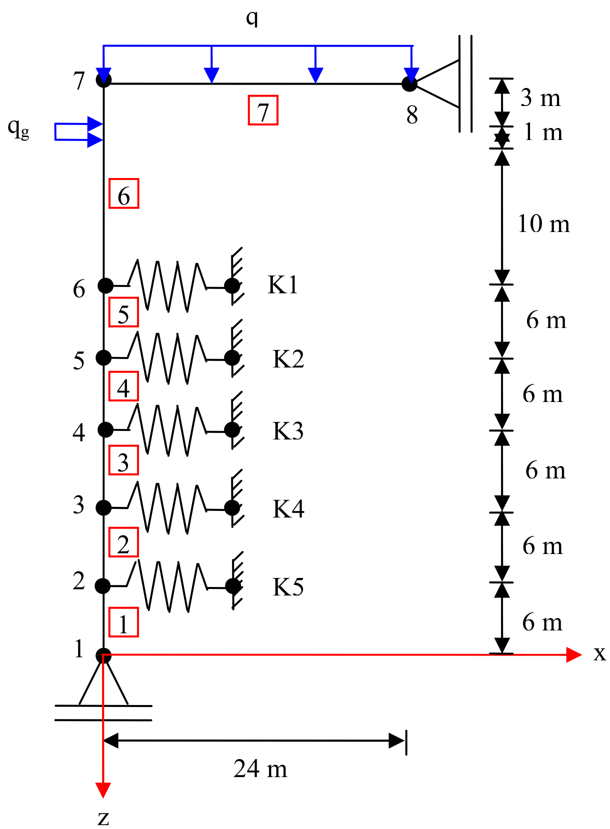
Voorbeeld 1

Dit raamwerk bestaat uit 1 stalen paal gemodelleerd met 6 elementen, 1 voorspanligger, 5 veren met veerafstanden van 6 meter, 2 roloplegginge, belasting q en belasting q_g.
De paal is stalen buispaal met de onderstaande gegevens:

$Es = 2{,}1\times10^5$ kN/m
$Is = 0{,}00551$ m^4
$As = 0{,}0557$ m^2

De ligger is voorspanligger met de onderstaande gegevens:

$Ec = 3{,}6\times10^4$ kN/m
$Ic = 0{,}3686$ m^4
$Ac = 0{,}3727$ m^2
Sterkteklasse = B55



Figuur H.10: Voorbeeld 1

Om de veerstijfheden te berekenen zijn van onderstaande formules gebruikt gemaakt:

$$\mathrm{E_{soil}} = 150000\frac{(2{,}17-e)^2}{(1+e)}\left(\frac{p'}{p_{atm}}\right)^{0,5}\left(\frac{0{,}0001}{\gamma}\right)^{0,4} \ [\mathrm{kN/m^2}]$$

$$\delta = \Delta T.\alpha.L/2 \ [\mathrm{m}]$$

$$\gamma = \frac{2\delta}{2H}$$

$$\mathrm{K_{horizontaal}} = \frac{4.Es/\pi}{(L/H)^{0,6}} \ [\mathrm{kN/m/m^2}]$$

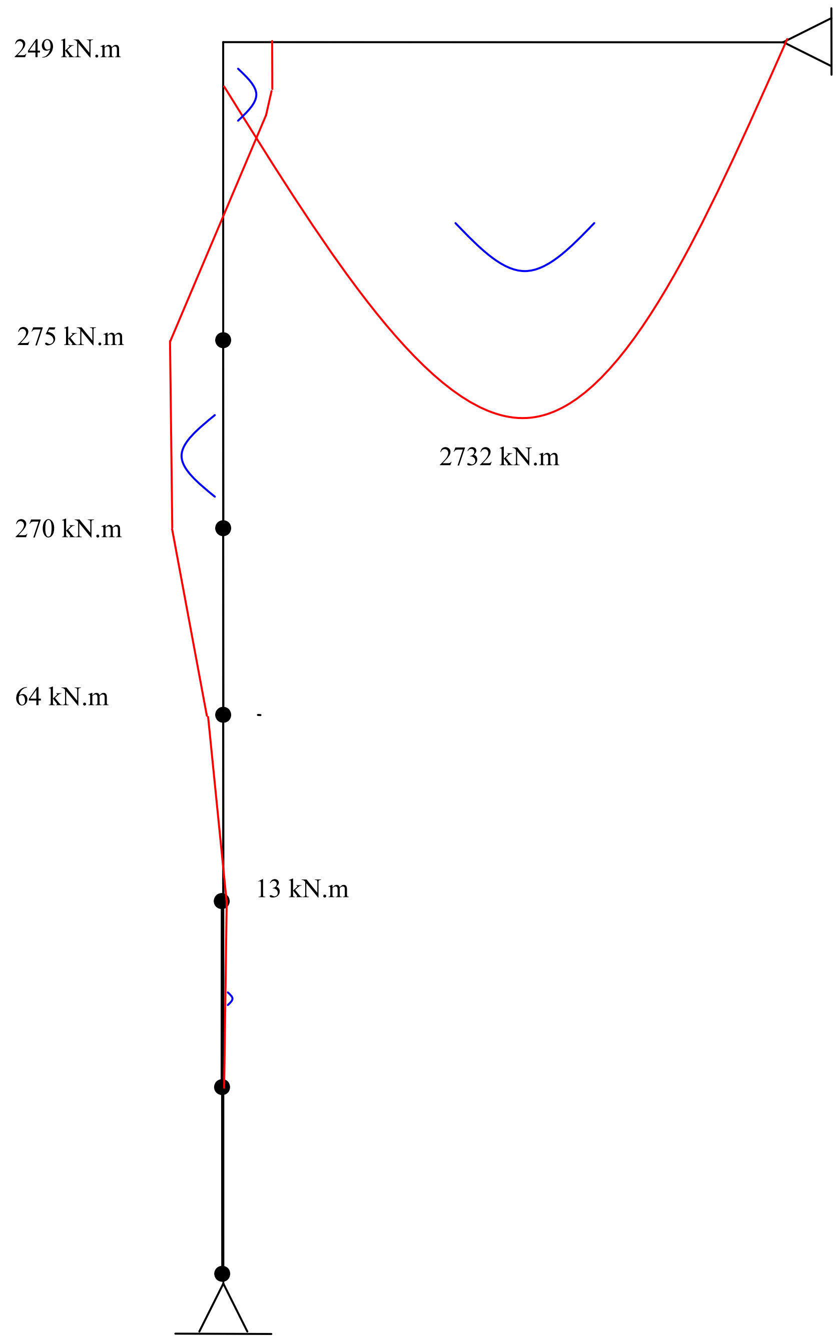
$$\mathrm{n_h} = \text{eenheidsbeddingconstante } [\mathrm{kN/m^3}]$$

$$\mathrm{K_{horizontaal}} = \mathrm{n_h.y/d_{paal}} \ \text{ en } \mathrm{Kveer} = \mathrm{K_{horizontaal}.Oppervlak_{veer}}$$

Voor slappe grondlagen gelden:

K1 = 4500 kN/m
K2 = 20250 kN/m
K3 = 31500 kN/m
K4 = 43750 kN/m

K5 = 54000 kN/m



Figuur H.11: Momentlijn van het model met 5 veren

Er wordt op de ligger de belasting q die bestaat uit verkeerbelasting, eigengewicht van liggers en gewicht van de slijtlaag aangebracht. De paal worden onder de belasting q_g ten gevolge van de golfbelasting aangebracht. De waarde van de q en de q_g zijn:

q =37,05 kN/m

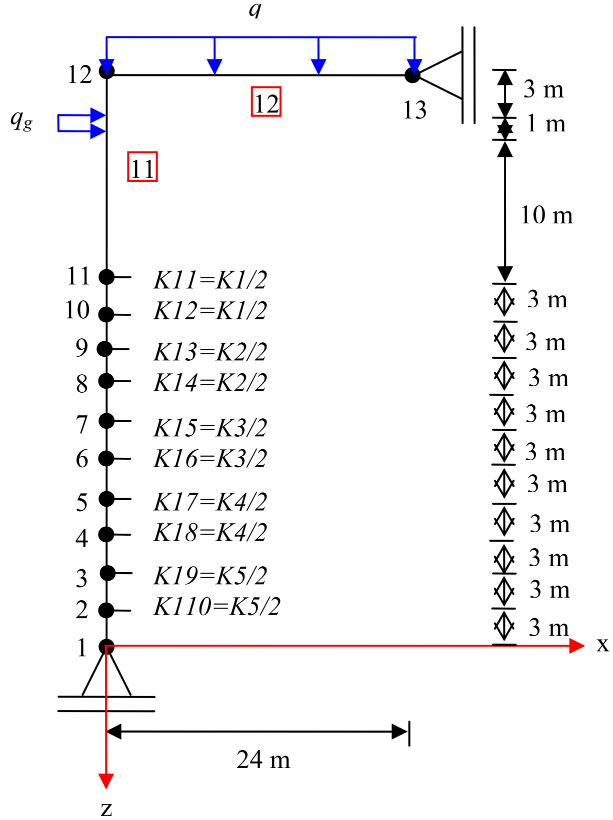
q_g = 50 kN/m

Voor het golfbelasting q_g is er verondersteld van een gelijkmatige belasting op het element 6 met de waarde 50 kN/m, zoals in figuur H.10 is weergegeven.

Met behulp van het programma wordt de momenten van de elementen berekend. Het resultaat is in figuur H.11 weergegeven.

Voorbeeld 2

Er wordt de afstand tussen de veren en de veerstijfheden gehalveerd, zie figuur h.12. Als de nieuwe momentlijn geen of heel weinig verschil geeft dan is de veerafstanden van figuur H.10 acceptabel. De veerafstanden zijn 3 meter voor dit raamwerk. De gegevens van dit model zijn als volgt:



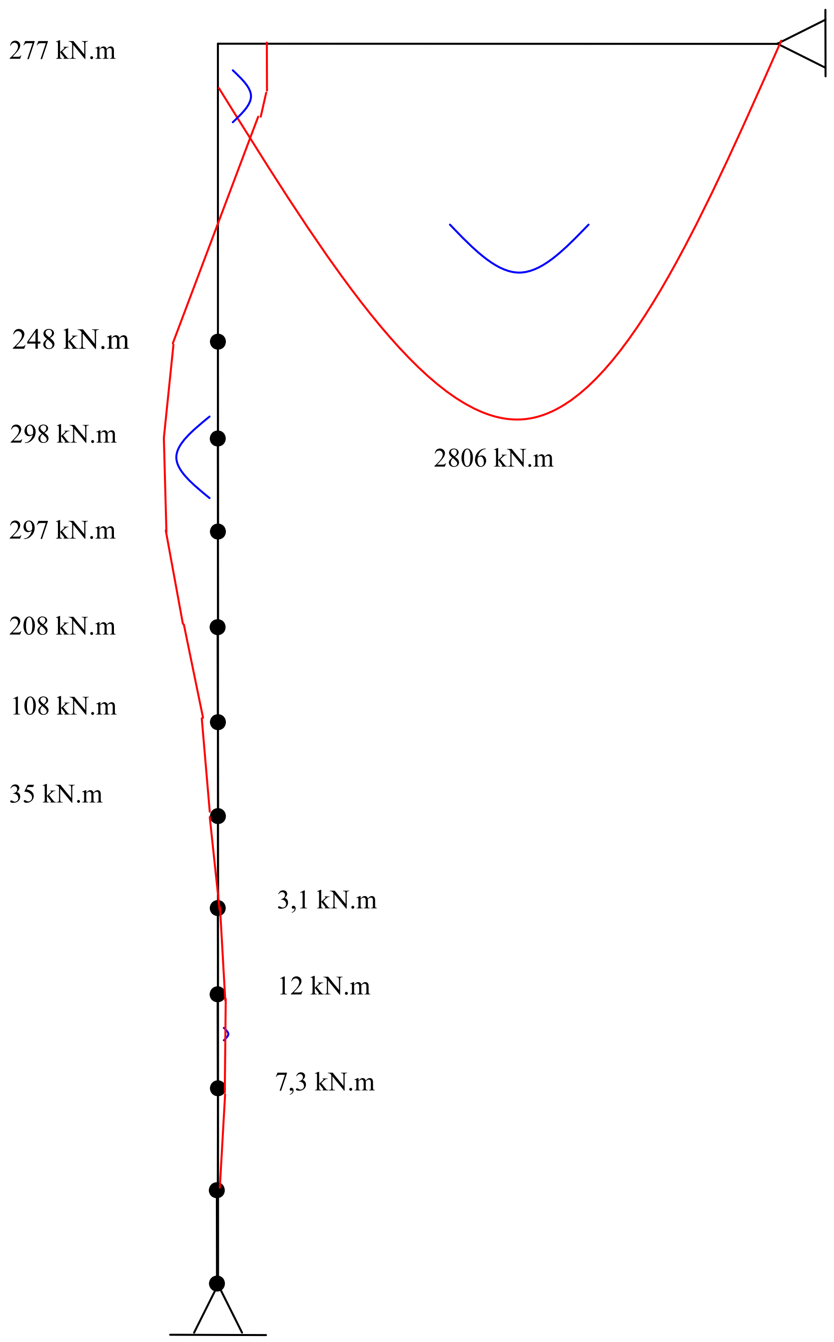
Figuur H.12: Voorbeeld 2

De waarde van de q en de q_g zijn:

q =37,05 kN/m
q_g = 50 kN/m

De palen zijn allemaal stalen buispalen met de onderstaande gegevens:

$Es = 2{,}1 \times 10^5$ kN/m
$Is = 0{,}00551$ m^4
$As = 0{,}0557$ m^2



Figuur H.13: Momentlijn van het model met 10 veren.

De liggers zijn allemaal voorspanliggers met de onderstaande gegevens:

Ec = 3,6×10^4 kN/m
Ic = 0,3686 m^4
Ac = 0,3727 m^2
Sterkteklasse = B55

Veerstijfheden:

$K11 = K12 = K1/2$ = 4500/2 kN/m
$K13 = K14 = K2/2$ = 20250/2 kN/m
$K15 = K16 = K3/2$ = 31500/2 kN/m
$K17 = K18 = K4/2$ = 43750/2 kN/m
$K19 = K110 = K5/2$ = 54000/2 kN/m

Het resultaat is in de figuur H.13 weergegeven.

De knoop 7 van figuur H.10 en de knoop 12 van figuur H.12 hebben dezelfde geometrische plaats. De momentwaarde van de knoop7 van figuur H.11 is 249 kN.m en die van figuur H.13 is 277 kN.m. Het verschil tussen deze momentwaarden is bijna 10%. Het is nog niet acceptabel. Dus er dient het proces te worden herhaald.

Voorbeeld 3

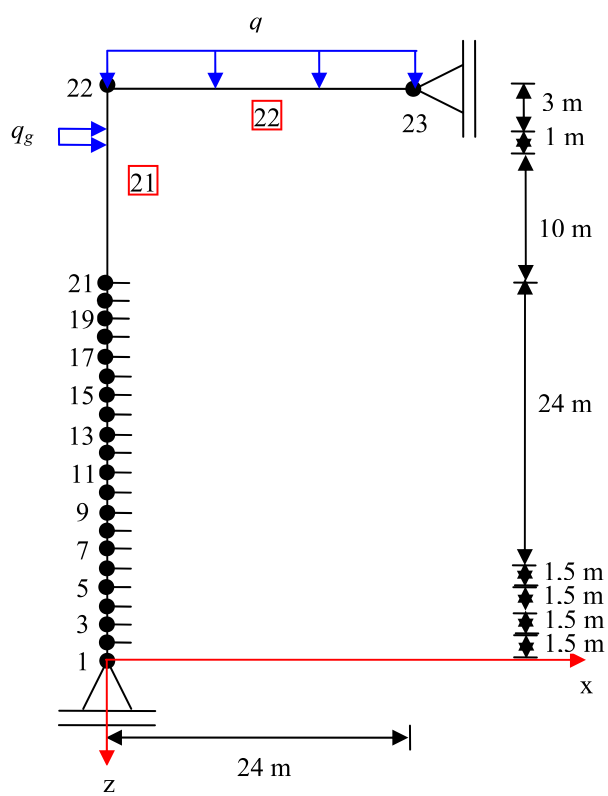
Er wordt de veerstijfheden en veerafstanden van figuur H.12 weer gehalveerd, zie figuur H.13. Als de nieuwe berekende momenten geen of heel weinig verschil geeft dan die van figuur H.13, is de veerafstanden van figuur H.12 acceptabel. De veerafstanden zijn voor dit model 1,5 meter. De gegevens van dit model zijn als volgt:

De waarde van de q en de q_g zijn:

q =37,05 kN/m
q_g = 50 kN/m

De paal is stalen buispalen met de onderstaande gegevens:

Es = 2,1×10^5 kN/m
Is = 0,00551 m^4
As = 0,0557 m^2



Figuur H.14: Voorbeeld 3

De liggers is voorspanligger met de onderstaande gegevens:

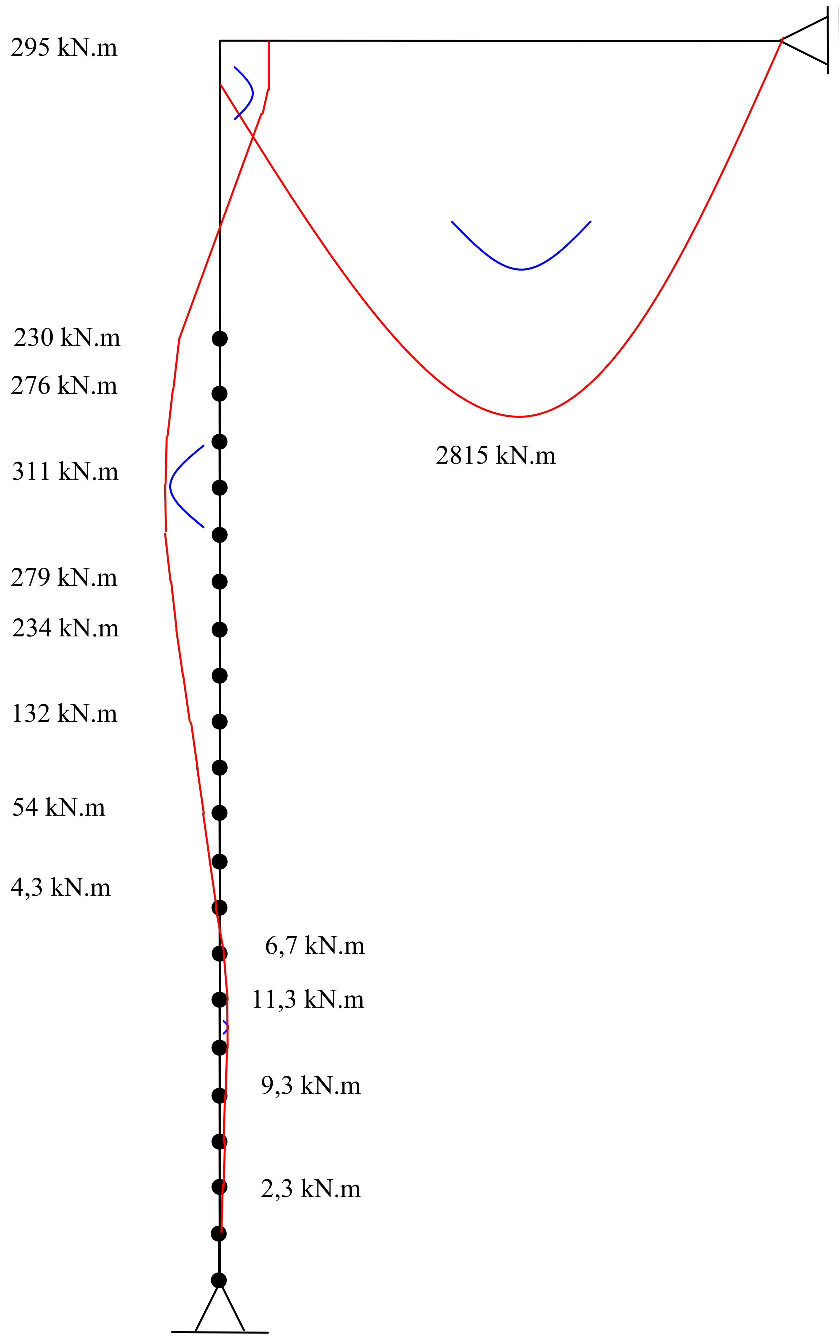
$Ec = 3{,}6 \times 10^4$ kN/m
$Ic = 0{,}3686$ m^4
$Ac = 0{,}3727$ m^2
Sterkteklasse = B55

Veerstijfheden:

$K21 = K22 = K23 = K24 = K11/2 = 4500/4$ kN/m
$K25 = K26 = K27 = K28 = K13/2 = 20250/4$ kN/m
$K29 = K210 = K211 = K212 = K15/2 = 31500/4$ kN/m
$K213 = K214 = K215 = K216 = K17/2 = 43750/4$ kN/m
$K217 = K218 = K219 = K220 = K19/2 = 54000/4$ kN/m

Het resultaat is in de figuur H.15 weergegeven.

Er worden momentwaarden van figuur H.13 en figuur H.15 met elkaar vergeleken. Nergens is het verschil groter dan 7,3%. Dus het model van figuur H.12 is net acceptabel. Dus de veerafstand van voorbeeld 2 wordt voor het model aangenomen. Dat betekent dat de veerafstanden dient 3 meter te zijn.



Figuur H.15: Momentlijn van het model met 20 veren.

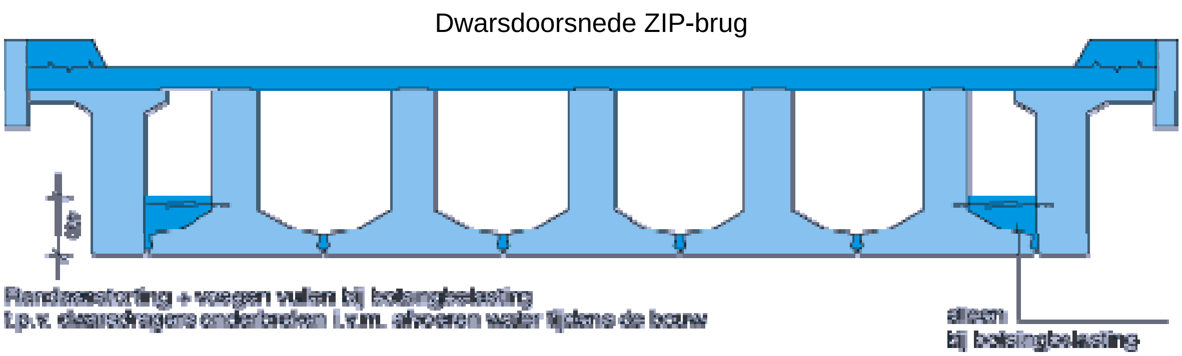
Berekening van voorspanliggers van de trestle brug

a. Bepaal de breedte van het brugdek. De rijweg in één richting bestaat uit twee rijstroken, een vluchtstrook, een schrikstrook en een geleiderail aan beide kanten van de viaduct.
Per rijrichting zijn de volgende breedtes benodigd:

- twee rijstroken à 3,60 m per rijstrook;
- een vluchtstrook à 3,60 m;
- een schrikstrook à 1,50 m;
- twee geleiderails à 1,40 m.

Voor het bepalen van de rijstrook en rijbaan afmetingen wordt uitgegaan van de richtlijnen voor ontwerp van autosnelwegen.

De brug krijgt een ontwerp dat ruimte biedt aan 2x2 rijstroken, 2x1 vluchtstrook en 2x1 inspectiepaden. Voor de vluchtstroken en de rijstroken is een breedte voorgeschreven van 3,50m plus 0,10m lijndikte voor binnenmarkering en 0,15m voor de buitenmarkering. De totale buitenmaat van 1,40m bestaat o.a. uit de inspectie paden welke een breedte hebben van 0,510m en de vangrail. De schrikstrook heeft een afmeting van 1,50m.
Er wordt voor 2 bruggen naast elkaar gekozen, dit in verband met een aantal voordelen zoals: dat het brugdek geen vierkante betonnen plaat wordt, er wordt gebruik gemaakt van het zogenaamde roostersysteem en de constructie wordt hierdoor goedkoper.
De brug is dus minstens: $1{,}50 \ + \ 2\times 0{,}15 \ + \ 3\times 3{,}50m \ + \ 0{,}10m \ + \ 2\times 1{,}40m \ = \ 15{,}10m$
Uitgaande van deze breedte wordt het aantal benodigde prefab-balken bepaald. De standaard breedte van een prefab ligger is 1,20m$\rightarrow$ er zijn dus 11 ZIP- en 2 TRA liggers voor deze brug nodig (zie Figuur H.16).



Figuur H.16: Brug doorsnede met ZIP-liggers en TRA rand-balken

b. Er is sprake van verkeersklasse 60 (de zwaarste belastingsklasse, vrachtauto's), en daarbij een bovenop geplaatste permanente belasting van 1,5 kN/m^2 (slijtlaag).

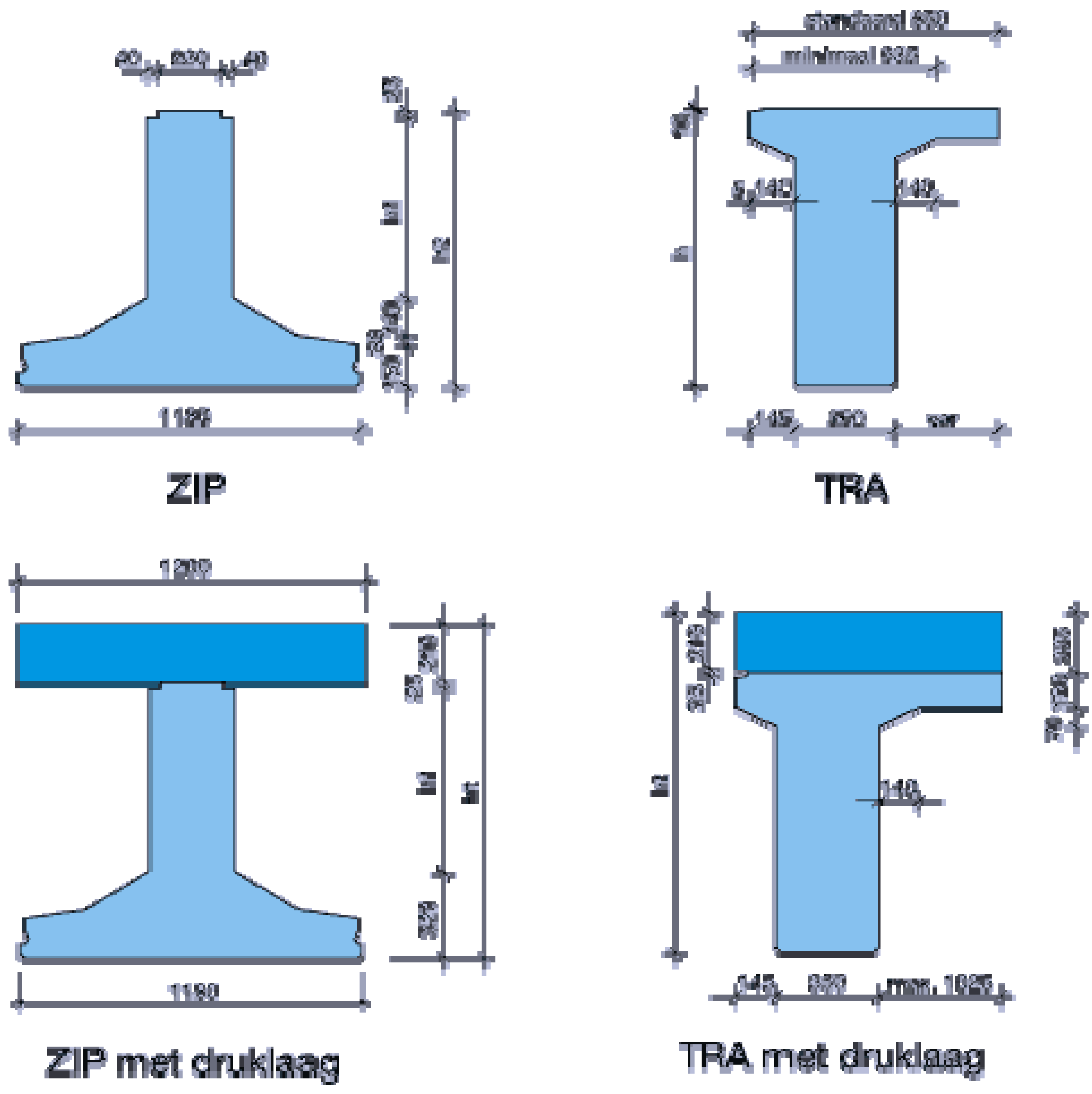
c. Schat op basis van een vuistregel de dikte van de ligger en kies een geschikte ligger, zie de informatie van de fabrikant. (tabel uit folder van Spanbeton, zie figuurH.18).

Voor de bepaling van de balkafmeting worden de volgende vuistregel gebruikt.

$$L/h \ = \ 22$$

$$h = 40/22 \ = \ 1{,}82m$$

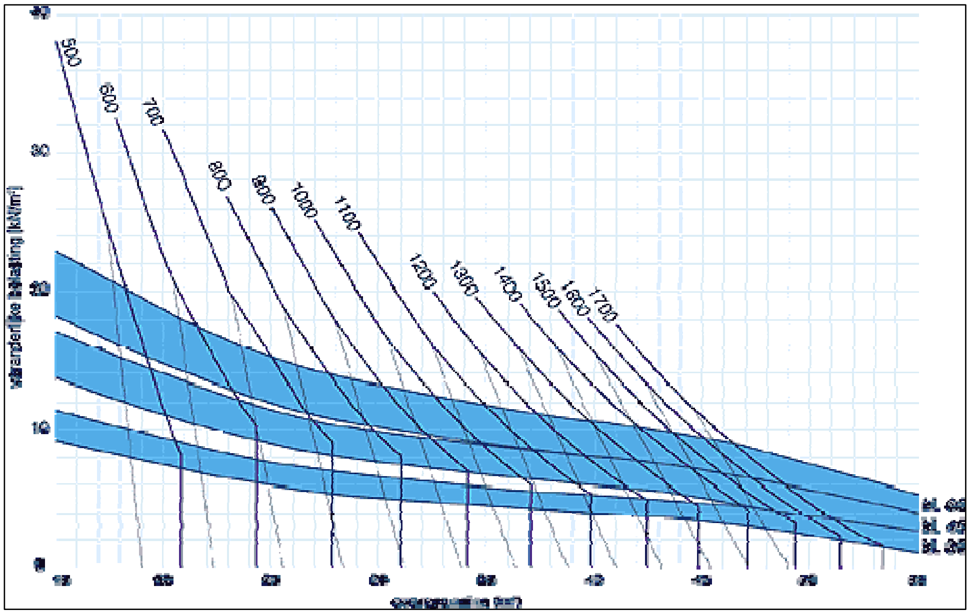
Met behulp van de tabellen en grafieken uit de folder Railbalk constructies van de fabrikant Spanbeton hebben we voor het ZIP systeem gekozen. Waaruit blijkt dat ZIP1600 met een druklaag van 210mm overeenkomt met de gevonden ***h*** van de vuistregel. De totale hoogte van de constructie is dan $h_t = 1615mm + 210mm = 1825mm$[2] (zie Figuur H.17).



Figuur H.17: Afmetingen ZIP-balk

[1]http://www.spanbeton.nl/weg_rail_zip-kenm.htm
[2]Er was niet de ontwerpgrafiek + 200 gebruikt omdat the regel van Thumb een veilige schatting is.

Met het gekozen profiel is een overspanning van 40m geschikt voor verkeersklasse 60. Zie onderstaande grafiek uit de folder Railbalk constructies van de fabrikant Spanbeton.



Figuur H.18: ontwerp grafiek van de fabrikant Spanbeton.

- $p_{zip} = 16{,}2$ kN/m
- $p_{zip} = 15{,}43$ kN/m
- $h_t = 1825$mm
- $h_1 = 1270$mm
- $h_2 = 1616$mm
- $I_b = 172{,}3 \times 10^9$mm^4
- $Z_b = 596$mm
- $A_b = 661{,}45 \times 10^3$mm^2
- $W_b = I_b / Z_b = 288{,}67 \times 10^6$mm^3
- $W'_b = I_b / (h_2 - Z_b) = 170{,}07 \times 10^6$mm^3
- $I_{b+d} = 368{,}6 \times 10^9$mm^4
- $Z_{b+d} = 853$mm
- $W_{b+d} = 432{,}08 \times 10^6$mm^3
- $W'_{b+d} = I_{b+d} / (h_2 - Z_{b+d}) = 486{,}98 \times 10^6$mm^3
- $W''_{b+d} = I_{b+d} / (h_t - Z_{b+d}) = 473{,}43 \times 10^6$mm^3

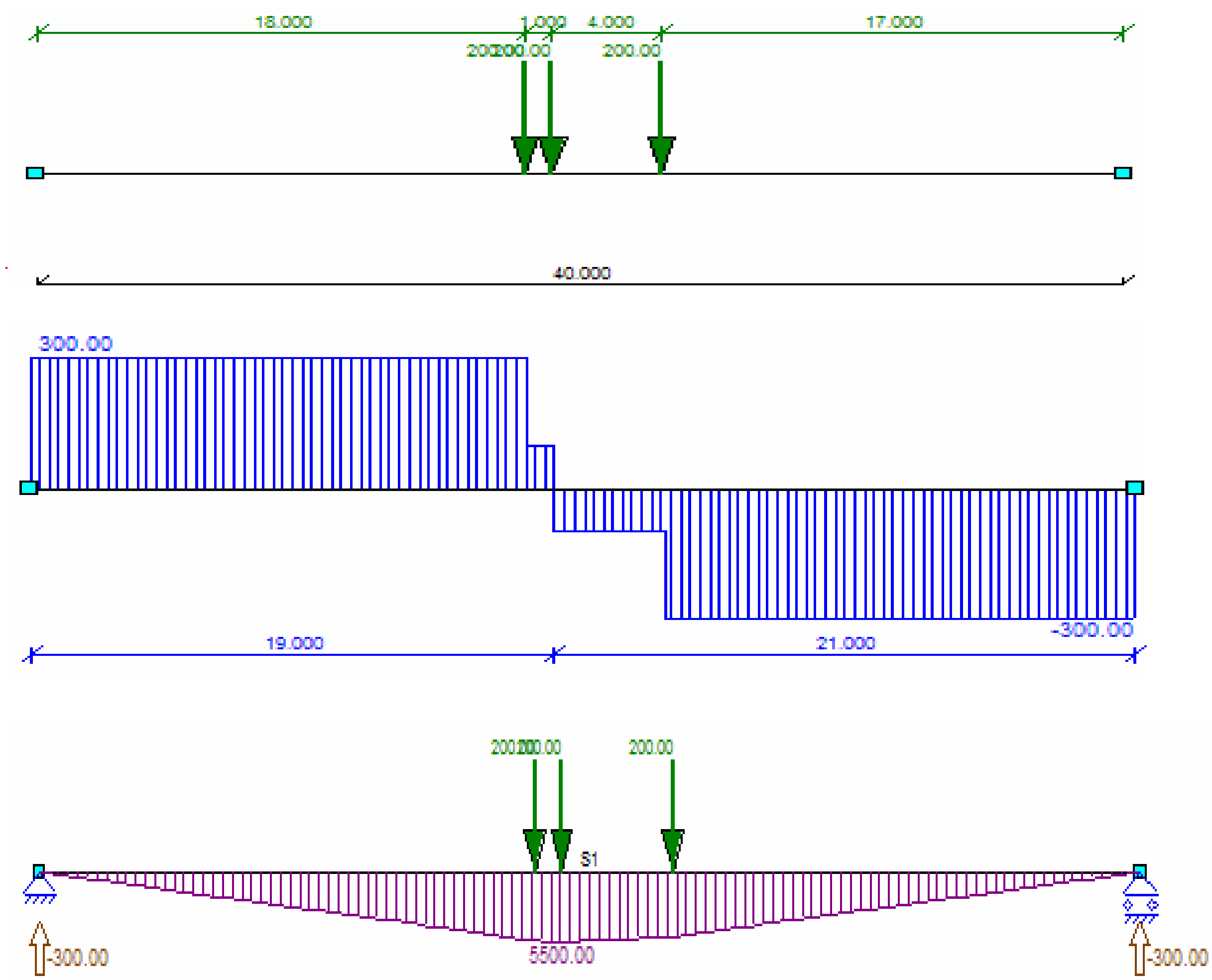
Zoals men in de figuur H.18 kan zien hebben wij TRA aan beide kanten van de brug voor botsing nodig. De breedte van de flens van de TRA beschouwen wij als veranderlijke waarde (X). Er kan deze waarde bepalen worden door de geometrie van de brug. We hebben namelijk 11 ZIP_balken and 2 TRA_balken nodig voor onze brug met de lengte van 15.1m: $11\times 1200 + 2 \times (350 + X) = 15100 \rightarrow X = 560$mm.

d. Veronderstel een belastingverdeling voor de as-belasting van de vrachtauto.

De mobiele belasting voor de verkeersklasse 60 is 4 kN/m en F_{mobiel} is 3 × 200 (3as belasting) = 600 kN. Er moeten de belastingen in de ongunstige plaatsen worden gezet. Er moet twee configuraties worden gecontroleerd (zie figuur H.19 en H.20).

d-1. De eerste configuratie

Voor dit geval is er de resultante van de 3 belastingen t.g.v. de wielen in het midden van de ligger:

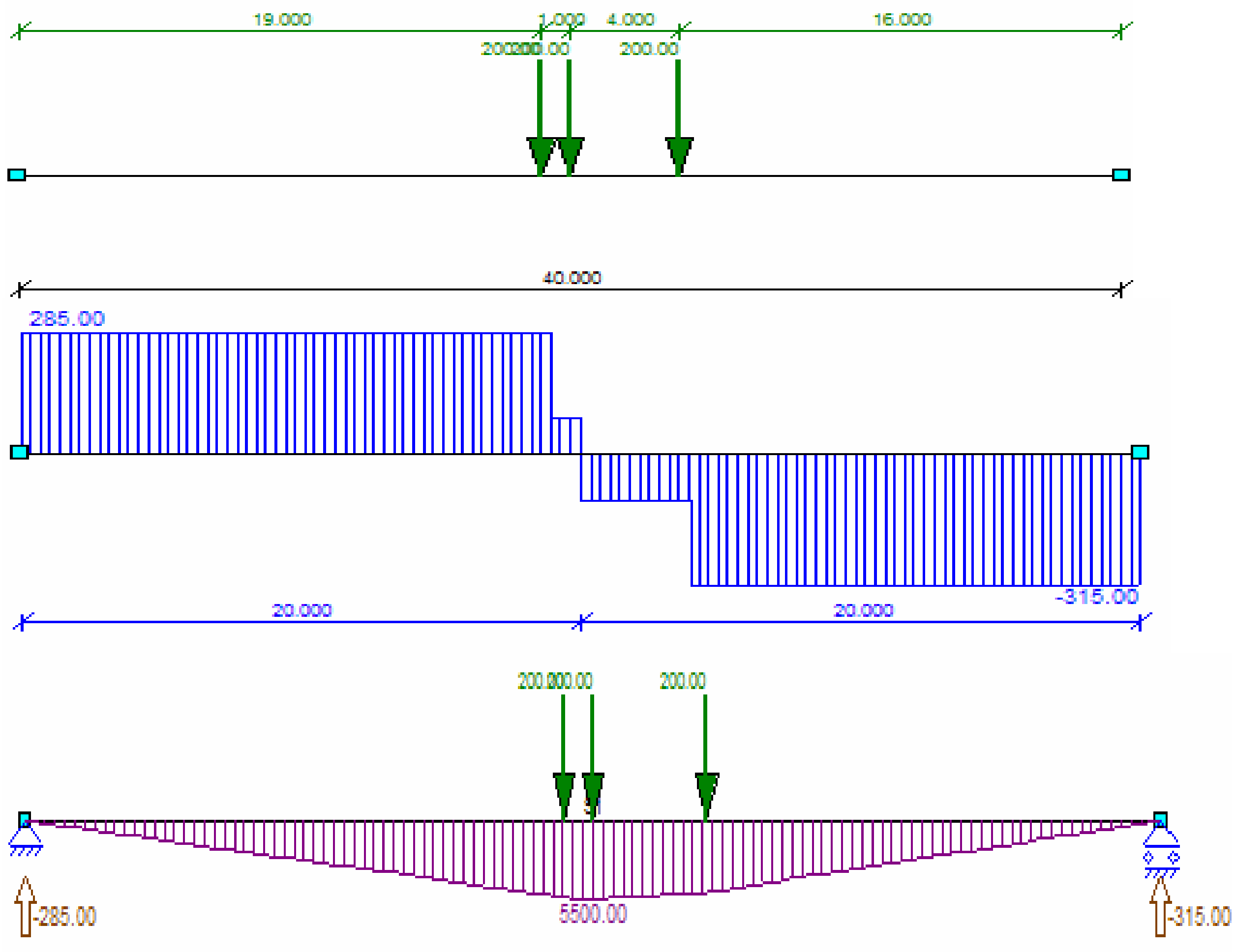


Figuur H.19: Eerste geval

M_{max1} = 5500kN.m

d-2. De tweede configuratie

We kunnen de plaatsen van de belastingen t.g.v. de wielen veranderen om het maximum moment in de ligger te verkrijgen.



Figuur H.20: Tweede geval

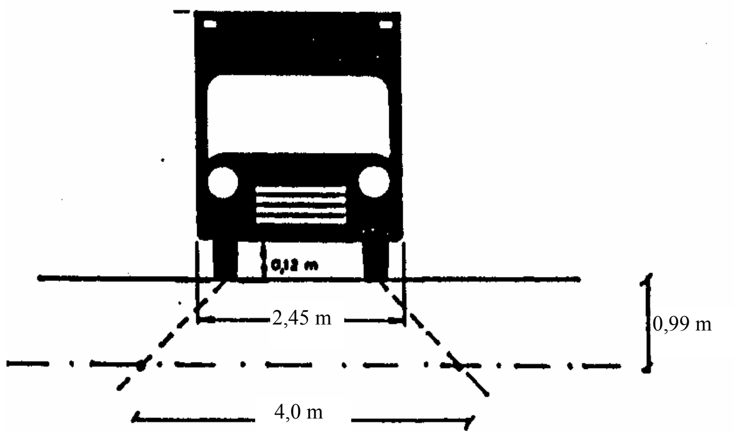
M_{max2} = 5500.00kN.m

Beide gevallen leiden tot dezelfde resultaten: M_{max1} = M_{max2} = 5500kN.m. Er wordt het tweede belastinggeval gekozen omdat het maximum moment bij het tweede geval in het midden van de overspanning is.

Nadat er de ongunstige configuratie wordt gekozen moet men nu 2 onderstaande belastinggevallen controleren.

- Belastinggeval 1: een vrachtauto
  Gelijkmatige verdeelde belasting: 4 kN/m^2
  1 auto: 3 × 200 kN

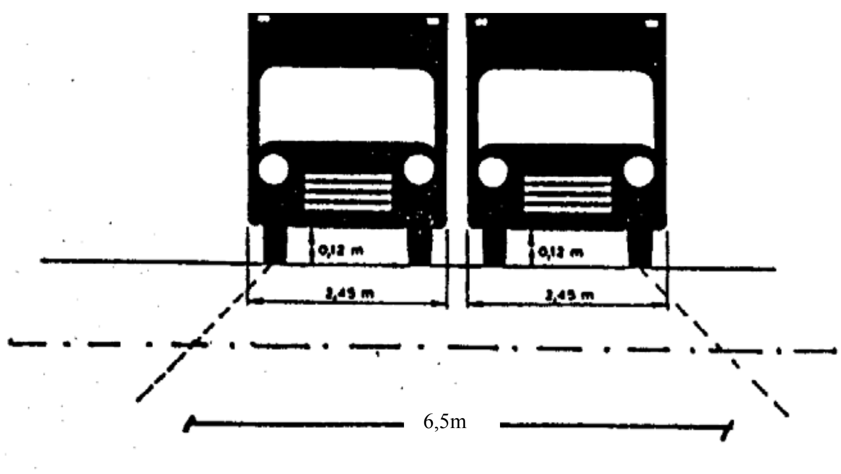
Het zwaartepunt van de samengestelde constructie vanaf de onderzijde ligger gemeten ligt op 853mm.Vanaf de bovenzijde gemeten bedraagt deze dan: 1825-853=972mm. De spreidingsbreedte is dan: $2 \times 0,972 + 2,00 = 3,94m \approx\ 4m$



Figuur H.21: Spreidingsbreedte, een vrachtauto

- Belastinggeval 2: twee vrachtauto's naast elkaar
  Gelijkmatige verdeelde belasting: 4 kN/m^2 × 0,8
  2 auto's: 2 × 3 × 200 kN × 0,8

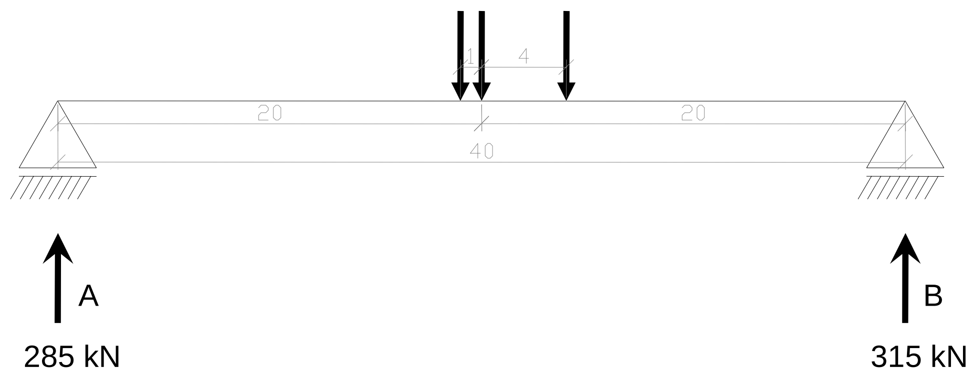
Bij belastinggeval 2 wordt uitgegaan van 2 vrachtauto's naast elkaar met een tussenafstand van 0,50m en een wielbasis van 2m.
Spreidingsbreedte is dan: $2\times 0,972+2\times 2+0,50=6,44m\approx\ 6,5m$



Figuur H.22: Spreidingsbreedte, twee vrachtauto's

e. Bepaal de belasting op de balk en vergelijk het antwoord met de ontwerpgrafiek van Spanbeton.

Belasting (puntlast)
De brug wordt geschematiseerd tot een ligger op twee steunpunten met daarop een drietal puntlasten van ieder 200 kN, die de aslasten van de vrachtautowagen voorstellen, zie figuur H.23.



Figuur H.23: Geschematiseerde ligger

e-1. Equivalente verdeelde belasting:

$$M/_{R_B} = 0 \Rightarrow 200\times16+200\times20+200\times21 - R_A\times40=0 \Rightarrow R_A = \frac{11400}{40} = 285kN.$$

$$R_B = 600-285 = 315\ kN$$

$$F_{resultante} = 600kN \text{ en de afstand tot punt } A \text{ is dan}: 21m$$

$$M_{\max} = 285kN\times20m - 200kN\times1m = 5500\ kNm$$

$$(1/8)q_{eq}\times l^2 = 5500 \implies q_{eq} = 27,5\ kN/m$$

e-2. Verdeelde belasting per ligger:

$$\begin{aligned} &\mathit{laststelsel}\ 1: && 4\times1,2 = 4,80\ kN/m \\ & && (q_{eq}/4m)\times1,2 = 8,25\ kN/m \end{aligned}$$

$$q_{tot} = 4,80\ kN/m + 8,25\ kN/m = 13,05\ kN/m$$

$$\begin{aligned} &\mathit{laststelsel}\ 2: && 4\times1,2\times0,8 = 3,84\ kN/m \\ & && (q_{eq}/6,5)\times1,2\times0,8\times2 = 8,12\ kN/m \end{aligned}$$

$$q_{tot} = 3,84\ kN/m + 8,12\ kN/m = 11,96\ kN/m$$

Laststelsel 1 is maatgevend → 13,05kN/m

e-3. Stootcoefficient (S):

$$\text{DAF} = S = 1 + C_0\,\frac{l}{h_t(100+l)} \qquad (l > 5\ m)$$

$$C_0 = 0,7\ (\mathit{prefab\ ligger,\ grindbeton})$$

$$h_t = 1,825\ m$$

$L \;=\; 40\; m$

$\rightarrow\; S \;=\; 1{,}11$

e-4 Last-lengte factor (B_v):

$$\mathrm{B} = B_v \; = 0{,}6 + \frac{40}{(100 + l)} \quad \Rightarrow \; B_v \; = 0{,}89$$

$S \times B_v = DAF \times B = 0{,}99 \approx 1$

$\text{Representatieve Belasting} \;=\; \text{Primaire belasting} \times S \times B_v$

Of:

$Q_d = \gamma \times Q \times DAF \times B$

De totale belasting op de maatgevende ligger bedraagt dan:

- ✓ uit het puntlastenstelsel: 8,25 kN/m
- ✓ uit de gelijkmatig verdeelde belasting: 4,80 kN/m

De belasting uit het eigengewicht en de rustende belasting bedragen:

- ✓ slijtlaag: $1{,}5 \times 1{,}2 = 1{,}8$ kN/m
- ✓ eigengewicht ZIP-ligger: 16,20 kN/m (zie folder van Spanbeton)
- ✓ druklaag (dikte 210 mm): $0{,}210 \times 1{,}2 \times 24 = 6{,}05$ kN/m $\approx$ 6kN/m

e-5. De samenvatting van de belastingen

Belastingen	Waarde
Puntlast Gelijkmatige verdeelde belasting (ULD)	8,25kN/m 4,80kN/m
Slijtlaag	1,8kN/m
Eigengewicht ZIP-Ligger Eigengewicht druklaag	16,2kN/m 6kN/m

Tabel H.1: Samenvatting van belastingen

e-6. Gebruikt de ontwerpgrafiek

Als wij de waarde van de drie eerste lijnen van de tabel H.1 beschouwen, kunnen wij een totale waarde van 14,85kN/m vinden. Het verdelen van deze waarde door de breedte van de ligger (1,2m) leidt tot een totale veranderlijke belasting van 12,375kN/m^2. Het kruispunt tussen veranderlijke belastingen (12,375kN/m^2) en de lengte van overspanning (40m) ligt tussen ZIP1300 en ZIP1400 in de ontwerpgrafiek.
Als men van een exacte belastingberekening (bijvoorbeeld met behulp van computerprogramma) gebruikt maakt dan kan men direct de uitgevondene liggernummer

via ontwerpgrafiek kiezen. Maar als men van een globale manier (handberekening) gebruik maakt dan moet men de uitgevondene liggernummer met het getal 200 optellen. In ons geval bijvoorbeeld, ligger ZIP1400 (uit grafiek) +200 = ligger ZIP1600, zie figuur 4.

Conclusie

In dit hoofdstuk is een model van een hoofddeel van trestle brug gemaakt. Behalve belastingen ten gevolge van de eigengewichten, verkeerbelasting en golfbelasting wordt de krimp- en temperatuurinvloeden op het model aangebracht. Krimp veroorzaakt de trekkracht in de liggers. Temperatuurinvloeden veroorzaken soms trek en soms drukkracht in de liggers. Het is afhankelijk van de tijd die het model wordt geanalyseerd. Bijvoorbeeld in winterseizoen is er trekkracht in het systeem ten gevolge van temperatuurinvloed en in het zomerseizoen drukkracht.
De veerafstanden zijn tevens aan de hand van de drie modellen verfijnd en getoetst. Volgens deze toetsing dient de afstand tussen de veren drie meter te zijn.

Bijlage I. Tweede toetsmodel

Inleiding

In dit hoofdstuk wordt het gemaakte model 1 uitgebreid naar het model 2. Behalve de krimp- en temperatuurinvloed wordt hier tevens het kruipeffect behandeld. Ook zijn de veerafstanden (Bijlage H) verfijnd. Tussen elke overspanning staan er drie parallel horizontale componenten. Elke component bestaat uit zes gelijkwaardige elementen. De bovenste component representeert een betonnen druklaag. De component in het middel is een prefab voorspanligger. De onderste component is een voorspankabel. De verbinding tussen dek en palen wordt uitgewerkt naar een realistischere verbinding dan in het model 1, (figuur 10.4). In dit hoofdstuk wordt het tijdafhankelijke gedrag van het model behandeld maar zijn de afmetingen en grootheden nog niet volledig realistisch.

Hoofddeel van de Trestle brug

Het tweede model bestaat uit drie overspanningen van 24 meter en vier palen van 44 meter. Aan elke paal zijn tien veerelementen verbonden als het model van de grondlagen. De verfijnde veerafstanden is drie meter. Tussen elke overspanning staan drie parallel horizontale componenten zoals in het vorige paragraf is uitgelegd. In principe wordt hier van het behandelde model in het paragraf 10.3 gebruik gemaakt. Maar hier wordt in plaats van twee componenten van drie componenten gebruik gemaakt. De derde component zijn eigenlijk voorspankabels, zie figuur I.1. De verticale afstand tussen deze componenten zijn de hart op hart afstand tussen de zwaartepunten van de prefab voorspanligger, voorspankabels en druklaag. Dus de grootheden van de verticale verbindingelementen zijn dezelfde als het paragraf 10.3. De waarde van de verdeelde belasting q en golfbelasting q_g zijn in bijlage H berekend en ze veranderen niet in dit model. De grootheden van de voorspanligger en druklaag zijn in bijlage H berekend, zie ook figuur I.2.

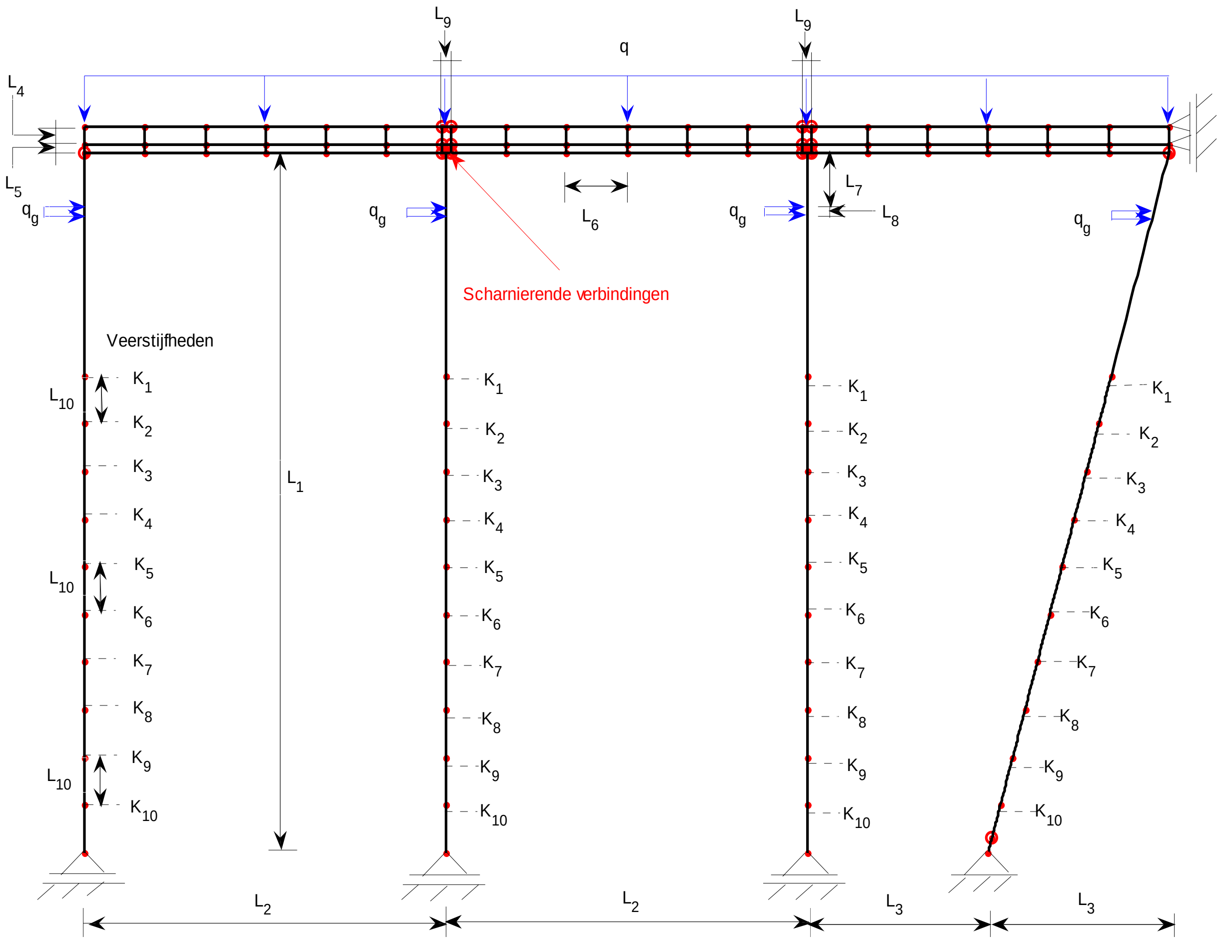
Voor de stalen palen worden hier voor de palen van diameter 1800 mm en dikte 4,17 mm gekozen. De grootheden van palen zijn dus als volgt:

$$E_{ps} = 2{,}1\times10^{5}\ \text{N/mm}^2$$

$$I_p = \frac{1}{4}\pi\times(1800^4-(1800-4{,}17)^4)\ \text{mm}^4$$

$$A_p = \frac{1}{4}\pi\times(1800^2-(1800-4{,}17)^2)\ \text{mm}^2$$

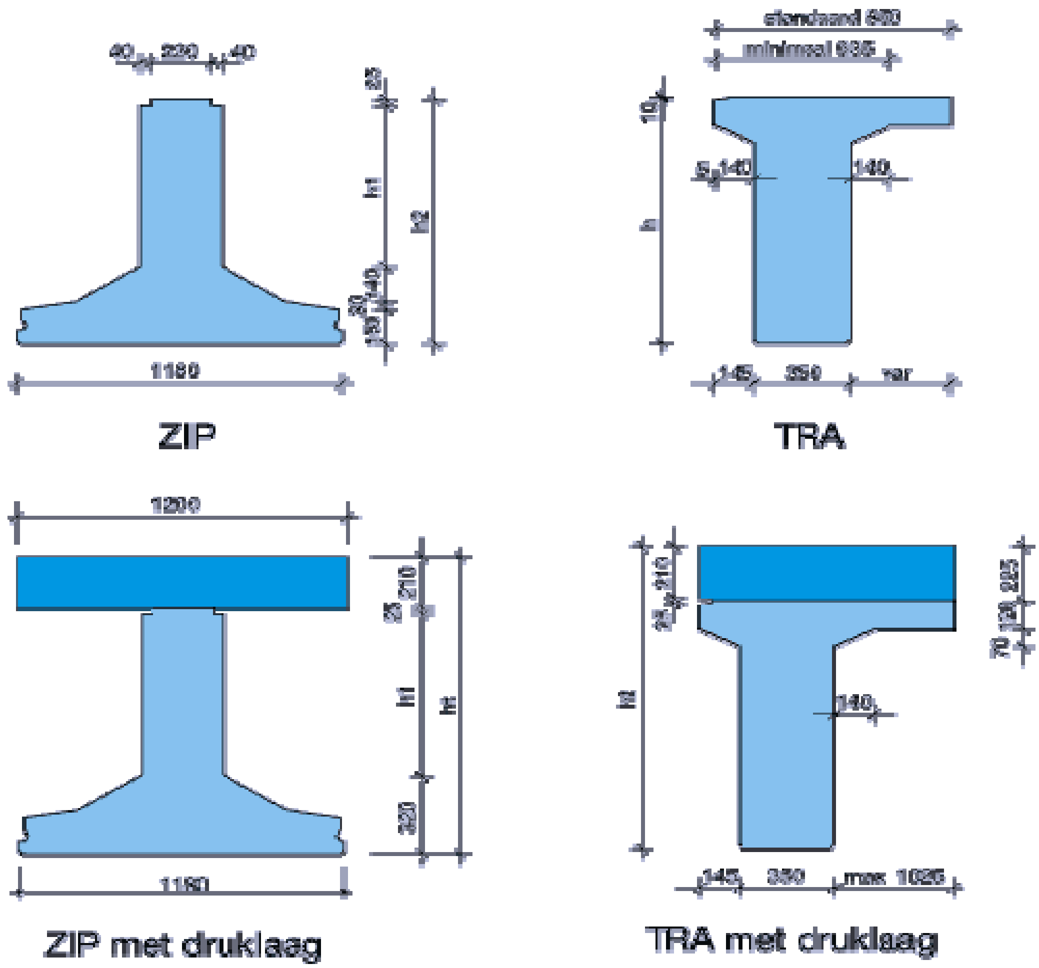
$$L_p = 44000\ \text{mm}$$



Figuur I.1: Model van het raamwerk

Voor de lengtes die in figuur I.1 is weergegeven gelden:

L_1 = 44000 mm
L_2 = 24000 mm
L_3 = 12000 mm
L_4 = 1130 mm
L_5 = 508 mm
L_6 = 4000 mm
L_7 = 3000 mm
L_8 = 1000 mm
L_9 = 600 mm
L_{10} = 3000 mm



Figuur I.2: Afmetingen ZIP-balk

Voor de doorsnedengrootheden weergegeven in figuur I.2 gelden:

- $p_{zip} = 16{,}2$ kN/m
- $p_{zip} = 15{,}43$ kN/m
- $h_t = 1825$ mm
- $h_1 = 1270$ mm
- $h_2 = 1616$ mm
- $I_b = 172{,}3 \times 10^9\ \text{mm}^4$
- $Z_b = 596$ mm
- $A_b = 661{,}45 \times 10^3\ \text{mm}^2$
- $W_b = I_b / Z_b = 288{,}67 \times 10^6\ \text{mm}^3$
- $W'_b = \mathrm{I_b} / (\mathrm{h_2} - \mathrm{Z_b}) = 170{,}07 \times 10^6\ \text{mm}^3$
- $I_{b+d} = 368{,}6 \times 10^9\ \text{mm}^4$

- Z_{b+d} = 853 mm
- W_{b+d} = 432,08 × 10^6 mm^3
- $W'_{b+d} = I_{b+d} / (h_2 - Z_{b+d})$ = 486,98 × 10^6 mm^3
- $W''_{b+d} = I_{b+d} / (h_t - Z_{b+d})$ = 473,43 × 10^6 mm^3
-

De grootheden van de voorspanligger zijn als volgt:

Sterkteklasse = B55
E_b = 36000 N/mm^2
I_b= 172,3 × 10^9 mm4
A_b = 661,45 × 10^3 mm^2
L_b = 4000 mm

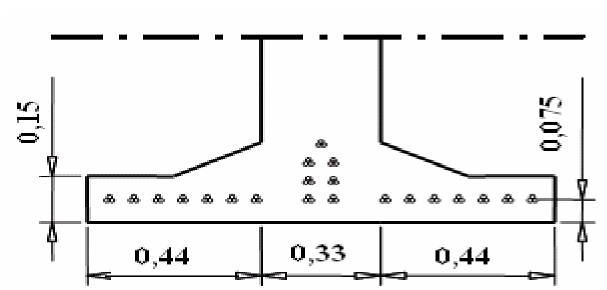
Voor de druklaag geldt:

Sterkteklasse = B35
E_d = 31000 N/mm^2

$$I_d = \frac{1200 \times 210^3}{12} \text{ mm}^4$$

A_d = 1200 × 210 mm^2
L_d = 4000 mm

Om de afstand tussen voorspanelement en voorspanligger te berekenen dient het zwaartepunt van beide componenten berekend te worden. De doorsnede wordt hier verder vereenvoudigd zoals in figuur I.3 is weergegeven.
Het zwaartepunt van de onderste bundels ligt op de helft van de onderflens, 75 mm vanaf de onderkant gemeten. De hoogte van een kabel (samengesteld uit 3 strengen) is 24 mm en de breedte 26 mm. In figuur I.3 is de doorsnede met de geplaatste kabels te zien. De minimale afstand tussen de kabels is 36 mm, wat ook gunstig is i.v.m. grootste korreldiameter bij het storten van beton. Voor de beugels is er een staafdiameter van 8 mm gekozen.



Figuur I.3: Voorspanstrengen in de doorsnede

Het zwaartepunt van alle kabels ligt op:

$$z = \frac{(7 \times 75) \times 2 + 2 \times 75 + 2 \times (75 + 60) + 1 \times (75 + 2 \times 60)}{19} = 88 \text{ mm}$$

Vanaf de onderkant van de ligger gemeten, komt een afstand van 88mm uit voor de waarde van z. Hiermee komt ***e*** uit op:

$$\boldsymbol{e} = z_b - z = 596 - 88 = 508 \text{ mm.}$$

De verticale afstand tussen de voorspanligger en druklaag zijn de afstand tussen de neutrale lijnen van de voorspanligger en de druklaag. Dus:

$$L_{v1} = \frac{210}{2} + (1615 - 590) = 1130 \text{ mm}$$

De verticale afstand tussen de voorspanligger en het voorspanelement zijn de afstand tussen de neutrale lijnen van de voorspanligger en het voorspanelement. Dus:

$$L_{vv} = e = 596 - 88 = 508 \text{ mm}$$

Voor de grootheden van de verticale elementen tussen de voorspanligger en voorspanelementen gelden:

$E_{vv} = 31000 \text{ N/mm}^2$

$$I_{vv} = \frac{300 \times 4000^3}{12} \text{ mm}^4$$

$A_{vv} = 300 \times 4000 \text{ mm}^2$

$L_{vv} = 508 \text{ mm}$

Voor de grootheden van de verticale elementen tussen de voorspanligger en druklaag zijn aangehouden:

$E_{vd} = 31000 \text{ N/mm}^2$

$$I_{vd} = \frac{300 \times 4000^3}{12} \text{ mm}^4$$

$A_{vd} = 300 \times 4000 \text{ mm}^2$

$L_{vd} = 1130 \text{ mm}$

De verbinding tussen de drie parallel horizontale componenten en palen wordt in figuur I.4 weegegeven.

De wapening voor het negatieve moment in de bovenkant van de drukklaag wordt hier door element 1 gemodelleerd, zie figuur I.4. Voor het element 1 is aangehouden:

$E_{1s} = 2,1\times10^5$ N/mm^2

$I_1 = 13\times\frac{1}{4}\pi\times12^4$ mm^4

$A_1 = 13\times\frac{1}{4}\pi\times12^2$ mm^2

$L_1 = 600$ mm

De ruimte tussen 2 prefab voorspanliggers in beide kanten van de paal wordt met beton ingevuld, zie figuur I.4. Deze ruimte en prefab ligger hebben dezelfde afmetingen maar met verschillende betonsterkte. Deze ruimte wordt hier door het element 2 gemodelleerd, zie figuur I.4. Voor dit element geldt:

Sterkteklasse = B35

$E_{2s} = 3,1\times10^4$ N/mm^2

$I_2 = 172,3\times10^9$ mm^4

$A_2 = 661,45\times10^3$ mm^2

$L = 600$ mm

Kesp wordt hier door het element 3 gemodelleerd, zie figuur I.4. Voor het element 3 is aangehouden:

Sterkteklasse = B35

$E_3 = 3,1\times10^4$ N/mm^2

$I_3 = \frac{1200^4}{12}$ mm^4

$A_3 = 1200\times1200$ mm^2

$L_3 = 600$ mm

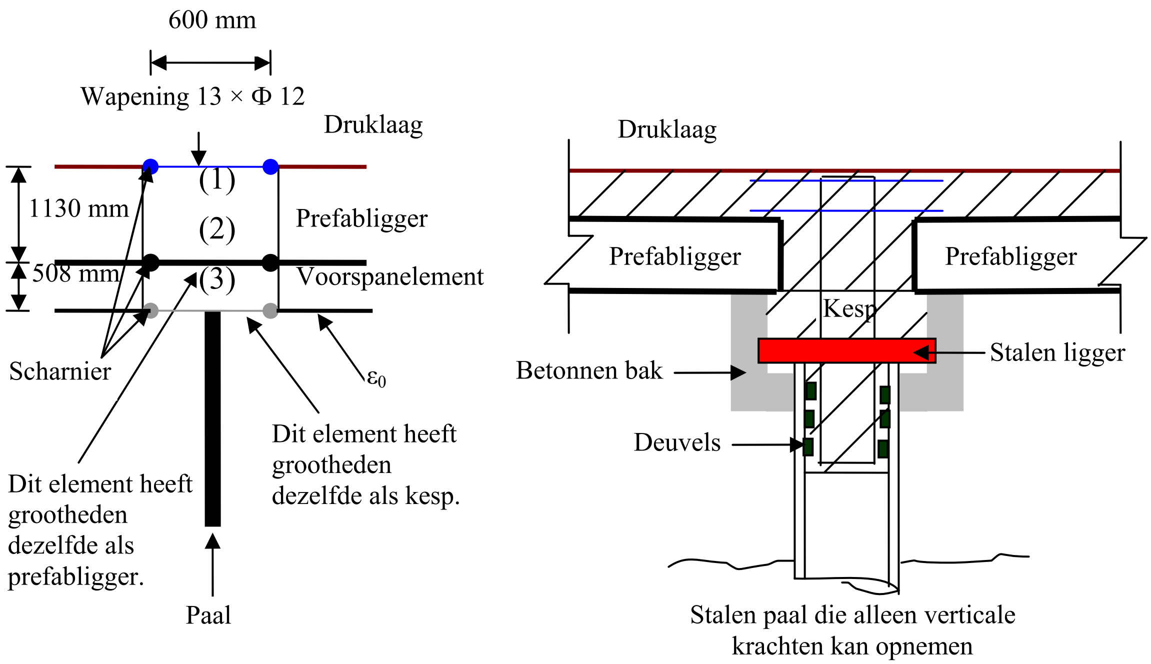
Om temperatuurinvloeden op de voorspanliggers en druklaag te berekenen zijn hier van de onderstaande gegevens gebruikt gemaakt:

$\alpha = 8,6\times10^{-6}$

$Dagelijkse\ \Delta T_{\max} = 5^o c$

$Jaarlijkse\ \Delta T_{\max} = 12^o c$

$$\Delta T = \sin(2\pi.\frac{uur}{24})\times\Delta T_{dag\max} + \sin(2\pi.\frac{dag}{365})\times\Delta T_{jaar\max}$$



Figuur I.4: Schematische weergave van de verbindingselementen

Om de veerstijfheden te berekenen zijn hier van de onderstaande formules gebruikt gemaakt:

$$\mathrm{E_{soil}} = 150000\frac{(2{,}17-e)^2}{(1+e)}\left(\frac{p'}{p_{atm}}\right)^{0,5}\left(\frac{0{,}0001}{\gamma}\right)^{0,4} \quad [\mathrm{kN/m^2}]$$

$$\delta = \Delta T.\alpha.L/2 \ [\mathrm{m}]$$

$$\gamma = \frac{2\delta}{2H}$$

$$\mathrm{K_{horizontaal}} = \frac{4.Es/\pi}{(L/H)^{0,6}} \quad [\mathrm{kN/m/m^2}]$$

$$\mathrm{n_h} = \text{eenheidsbeddingconstante } [\mathrm{kN/m^3}]$$

$$\mathrm{K_{horizontaal}} = \mathrm{n_h.y/d_{paal}} \ \text{ en Kveer} = \mathrm{K_{horizontaal}.Oppervlak_{veer}}$$

Voor de slappe grondlagen zijn aangehouden:

K1 = 4500 kN/m
K2 = 12375 kN/m
K3 = 20250 kN/m
K4 = 25875 kN/m
K5 = 31500 kN/m
K6 = 37625 kN/m
K7 = 43750 kN/m

K8 = 48875 kN/m
K9 = 54000 kN/m
K10 = 59125 kN/m

Er worden op de liggers de belasting q ten gevolge van de verkeerbelasting, het eigengewicht van liggers en het gewicht van de slijtlaag aangebracht. Er worden op de palen de belasting q_g ten gevolge van de golfbelasting aangebracht. Voor de golfbelasting q_g is er een gelijkmatige belasting verondersteld met de waarde 50 kN/m, zoals in figuur I.1 is weergegeven.
De waarde van de q is 37,05 kN/m en de q_g is 50 kN/m.
Om krimpinvloed op de voorspanliggers te berekenen zijn hier van de onderstaande gegevens gebruikt gemaakt:

Sterkteklasse = B55

$\varepsilon'_r = \varepsilon'_c \cdot k_b \cdot k_h \cdot k_p \cdot k_t \leq \varepsilon'_{\max}$

$\varepsilon'_c = 0,0001 \;\; zeer\ vochtig$

$k_b = 0,8$

$\varepsilon'_{\max} = 0,00008$

$Wapeningpercentage = 0,86\%$

$O_b = 5400\ mm$

Om krimpinvloed op de druklaag te berekenen zijn hier van de onderstaande gegevens gebruikt gemaakt:

Sterkteklasse = B35

$\varepsilon'_r = \varepsilon'_c \cdot k_b \cdot k_h \cdot k_p \cdot k_t \leq \varepsilon'_{\max}$

$\varepsilon'_c = 0,0001 \;\; zeer\ vochtig$

$k_b = 1$

$\varepsilon'_{\max} = 0,0001$

$Wapeningpercentage = 0,18\%$

$O_b = 2820\ mm$

Om kruipinvloed op de voorspanliggers te berekenen zijn hier van de onderstaande gegevens gebruikt gemaakt:

Sterkteklasse = B55

$\phi(t, t_c) = k_c \times k_b \times k_h \times k_d \times k_t £\phi_{\max}$

$k_c = 1,4 \;\; zeer\ vochtig$

$k_b = 0,8$

$k_b = 0,8$

$\phi_{\max} = 1,3$

$t_c = 60\ dagen$

$O_b = 5400\ mm$

Om kruipinvloed op de druklaag te berekenen zijn hier van de onderstaande gegevens gebruikt gemaakt:

Sterkteklasse = B35

$\phi(t,t_c) = k_c \cdot k_b \cdot k_h \cdot k_d \cdot k_t \leq \phi_{\max}$

$k_c = 1,4\ \ zeer\ vochtig$

$k_b = 1$

$\phi_{\max} = 1,8$

$t_c = 0$

$O_b = 2820\ mm$

Om de aanvangsvoorspankracht in het model in beschouwing te nemen wordt hier van een constant initiële rek in de voorspanelementen gebruik gemaakt. Deze rek wordt als een soort krimp in het programma beschouwd. Dus het proces van de implementatie van deze initiële rek is hetzelfde als de krimpimplementatie. Deze initiële rek blijft constant in de loop van de tijd. De waarde van de initiële rek is:

$$\varepsilon_0 = \frac{f_p}{E_s}$$

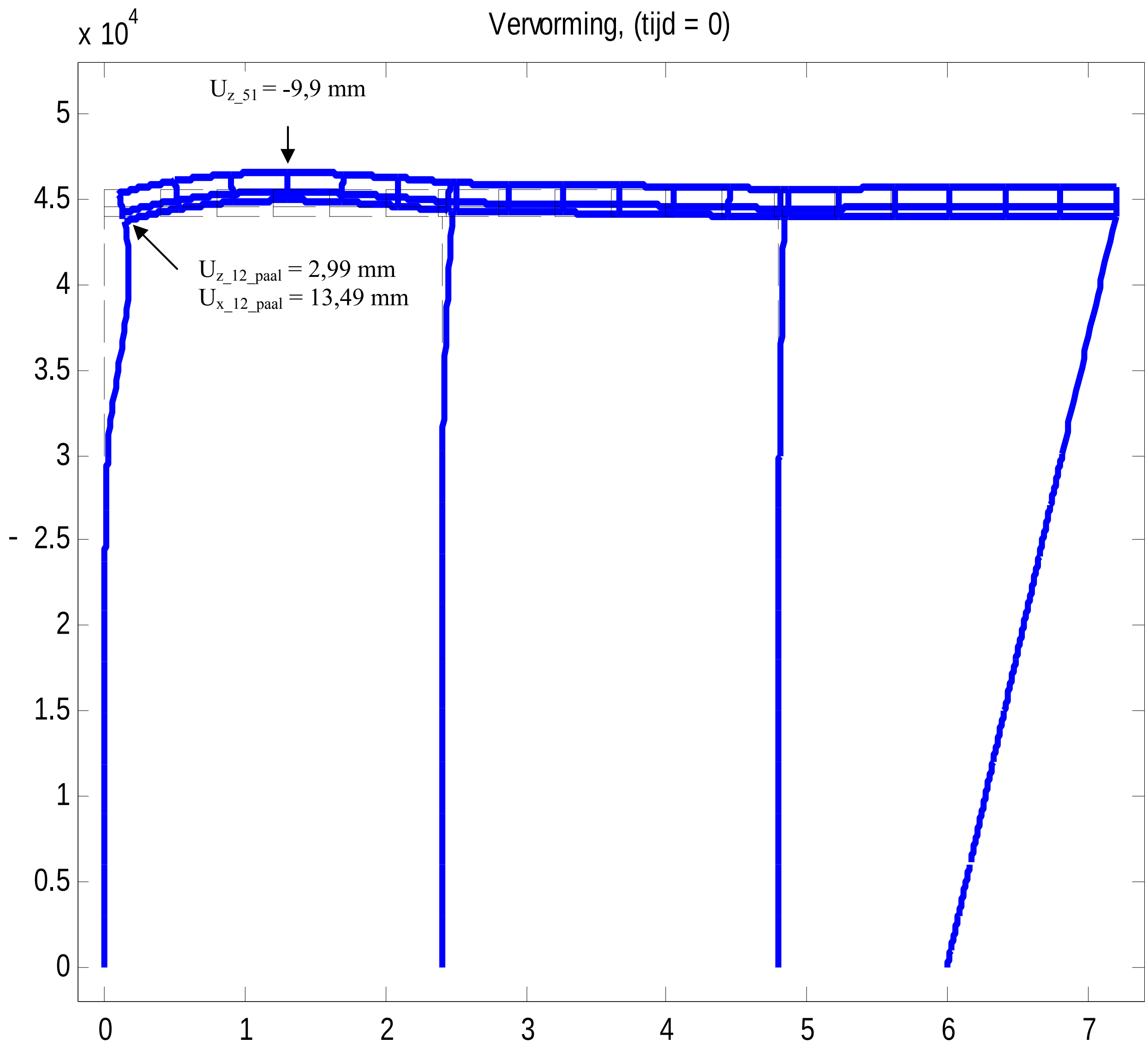
$f_p = 900\ \text{N/mm}^2$

$Es = 2,1 \times 10^5\ \text{N/mm}^2$

Deze gegevens worden allemaal op het programma ingevoerd. Nu wordt er op drie verschillende tijdstippen de normaalkrachtlijnen en vervorming van de constructie bekeken. Eerste is het eind van de eerste dag na de uitvoering van de constructie. Het tweede tijdstip is aan het eind van het tweede jaar. En de derde is aan het eind van de levensduur van de brug dus aan het eind van het twintigste jaar. Een aantal punten van de constructie zijn gekozen om het verplaatsingverloop in de loop van de tijd nader te bekijken.

Vervorming ten gevolge van alleen voorspankracht

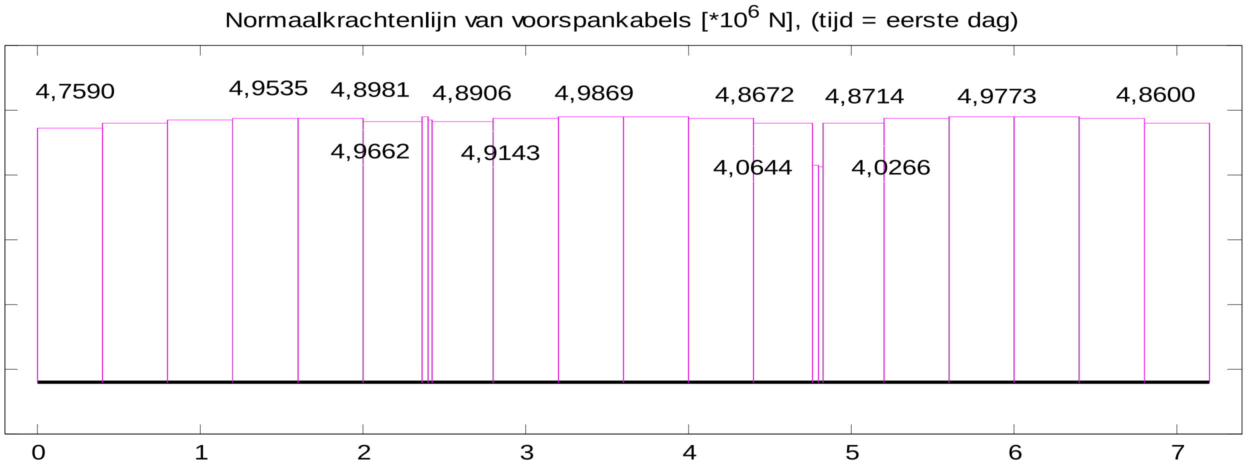
Hier wordt de vervorming van de constructie ten gevolge van alleen voorspankracht in figuur I.5 weergegeven. Dus hier is geen sprake van eigengewicht, verkeer- en golfbelasting. Het tijdstip is tevens nul. In dit geval is er ook geen sprake van krimp, kruip en temperatuurinvloed. Dus hier wordt het implementeren van de initiële rek ten gevolge van de voorspankracht ook getoetst. Er is te zien dat de vervormingen van de constructie ten gevolge van de voorspankracht naar verwachting is.



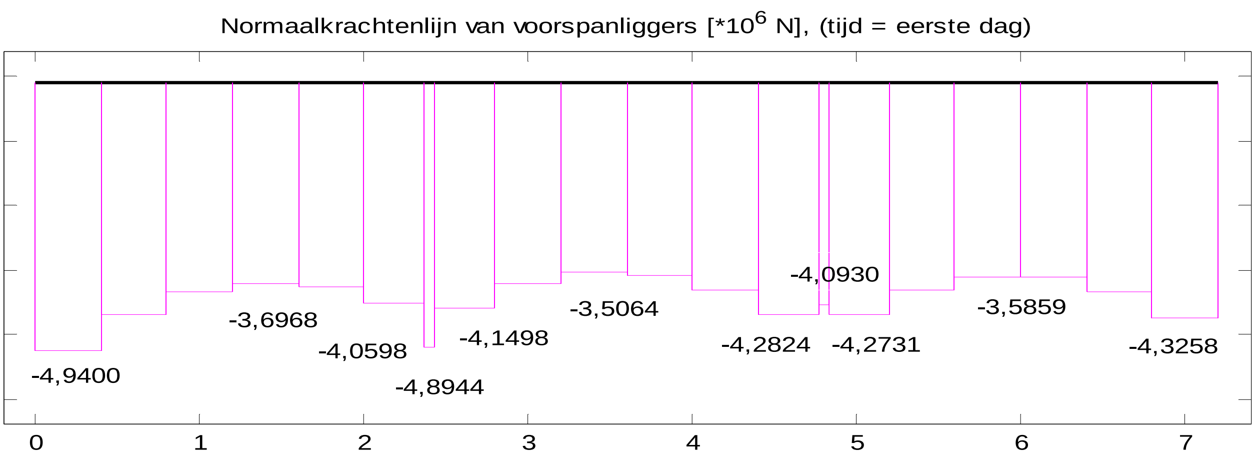
Figuur I.5: Vervorming op het tijdstip = 0

Resultaten na de eerste dag

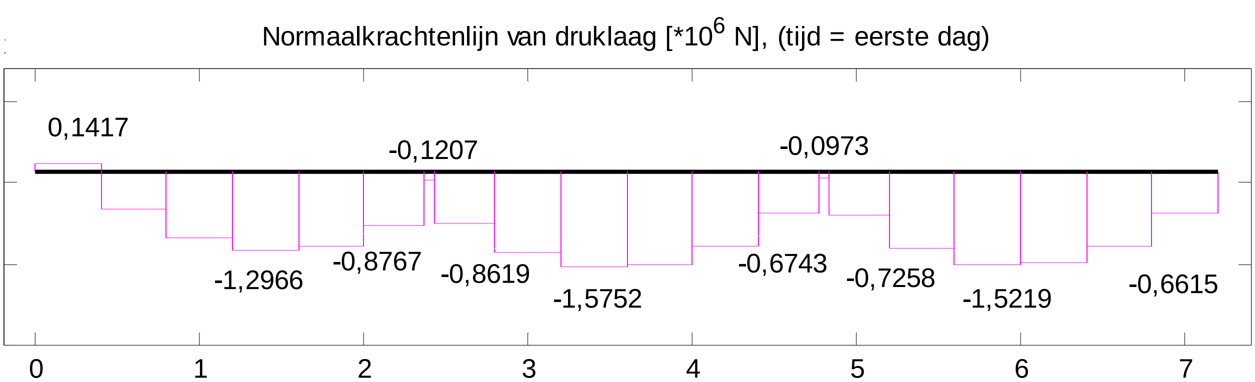
Hier worden de normaalkrachtlijnen van de voorspanelementen, voorspanliggers, druklaag en gehele constructie, de getekend. Tevens wordt hier de vervorming van de constructie na één dag geplot, zie tevens figuur I.6 tot en met I.10.



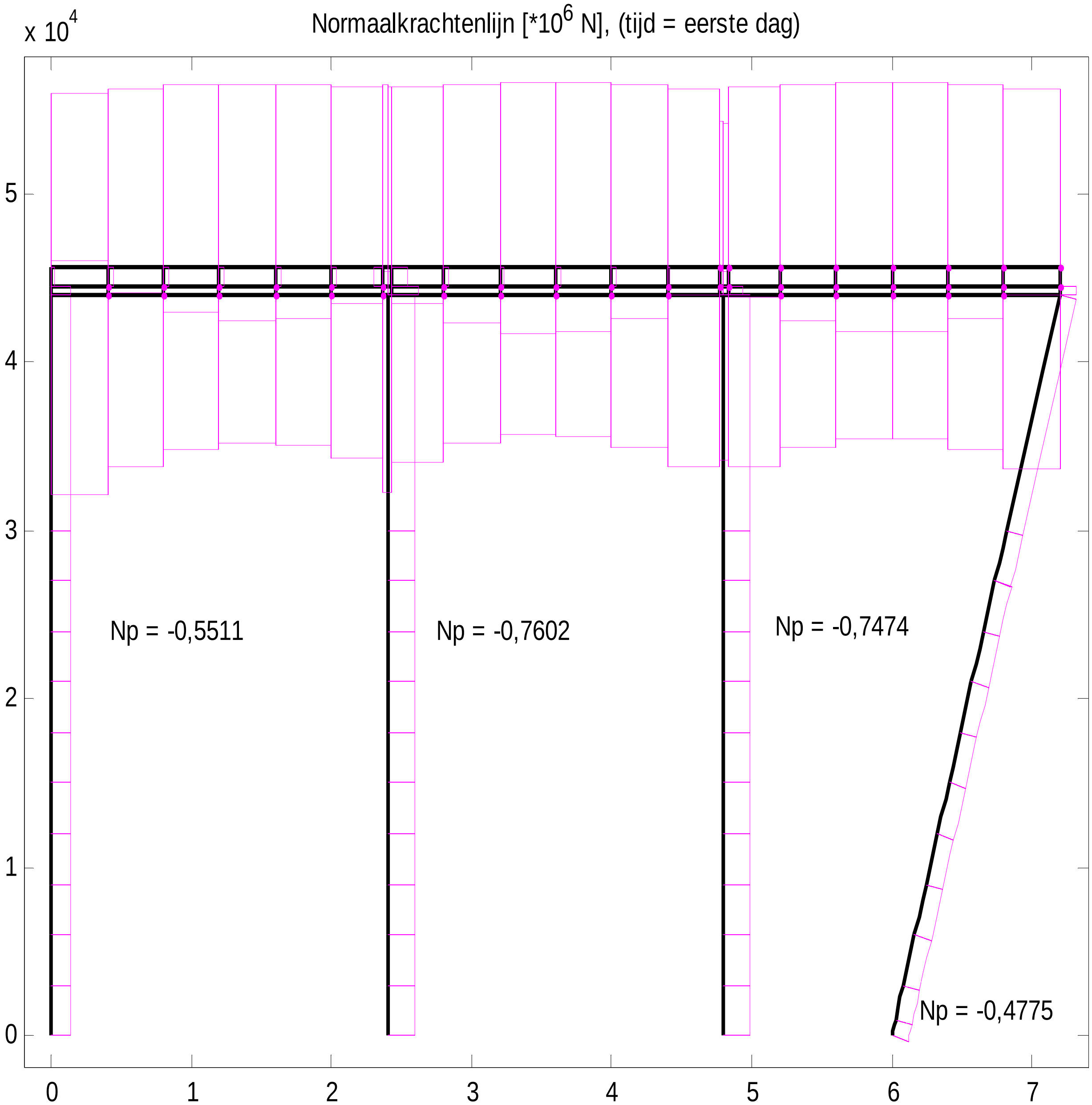
Figuur I.6: Normaalkrachtlijnen van de voorspanelementen na eerste dag



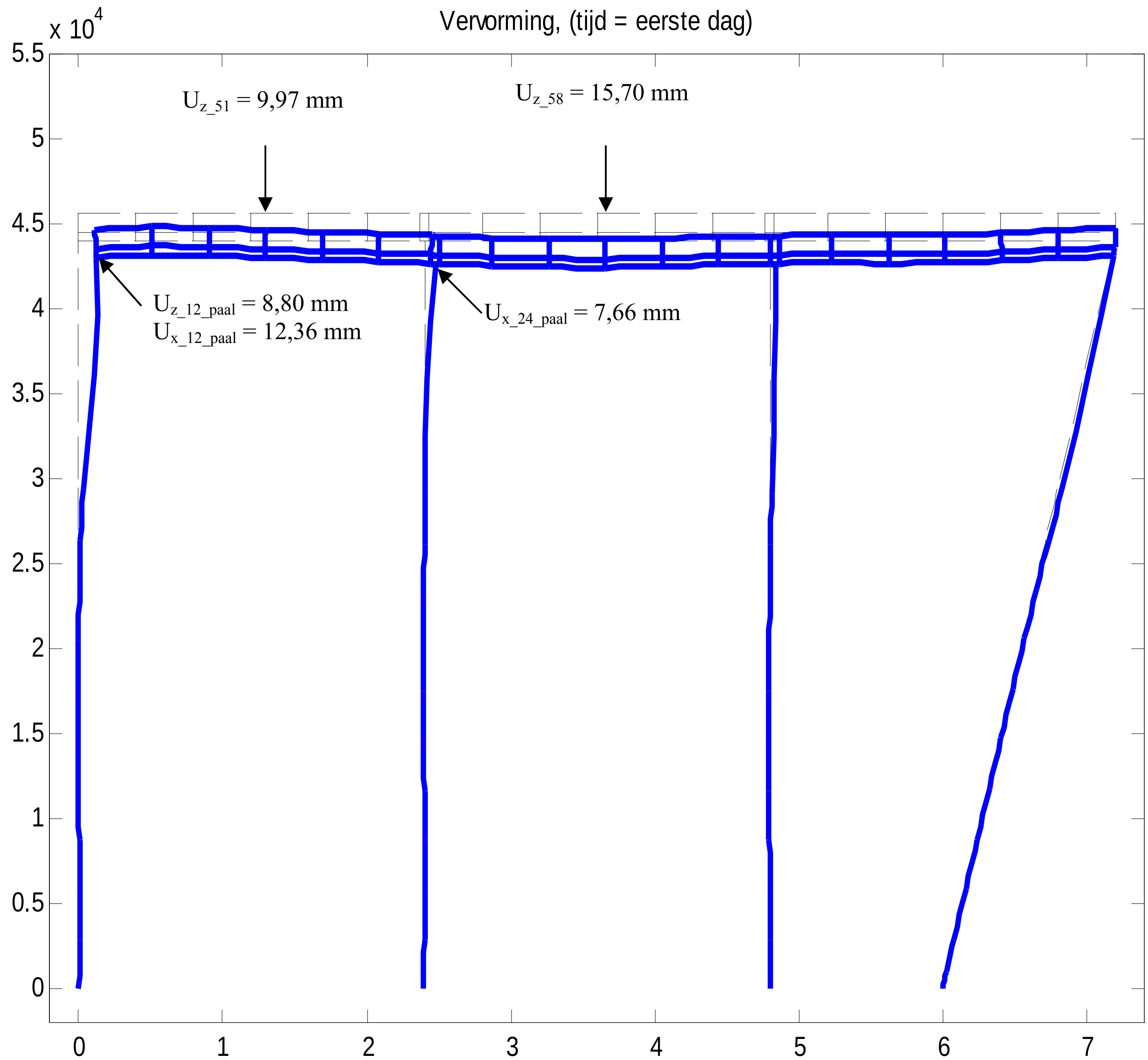
Figuur I.7: Normaalkrachtlijnen van de voorspanliggers na eerste dag



Figuur I.8: Normaalkrachtlijnen van de constructie na eerste dag



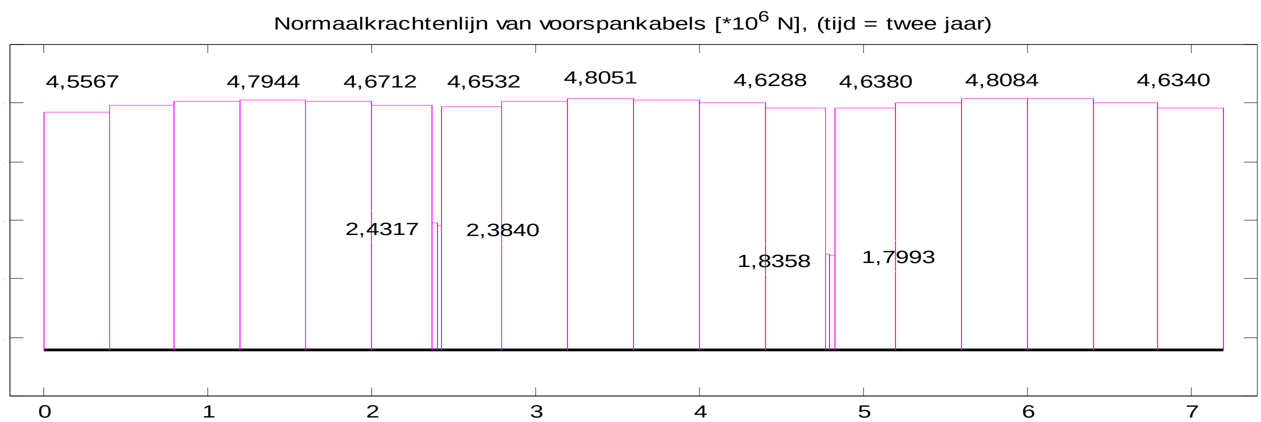
FiguurI..9: Normaalkrachtlijnen van de constructie na eerste dag



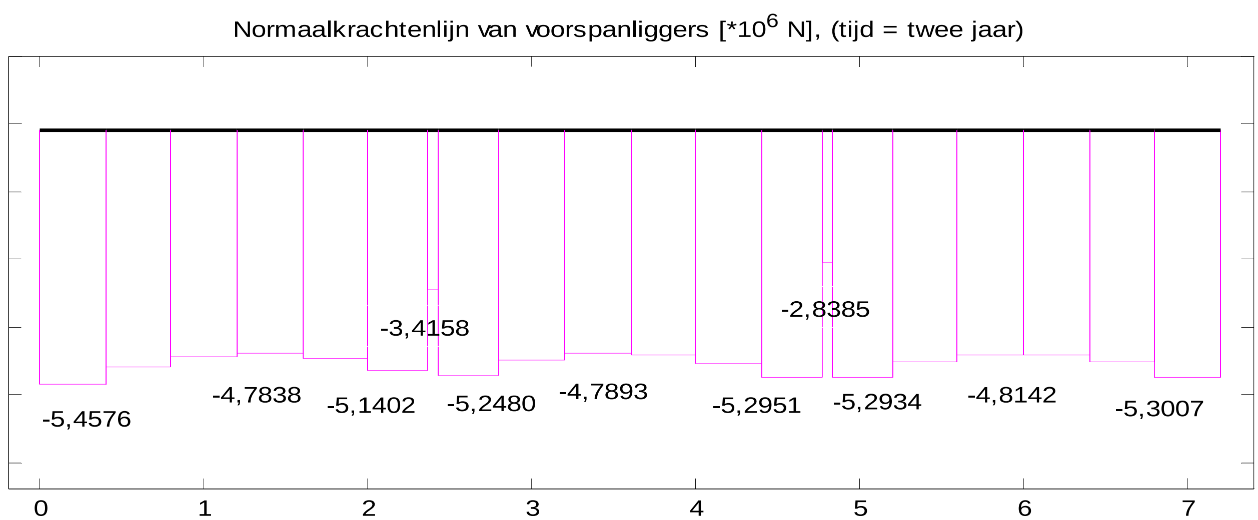
Figuur I.10: Vervorming van de constructie na eerste dag

Resultaten na het tweede jaar

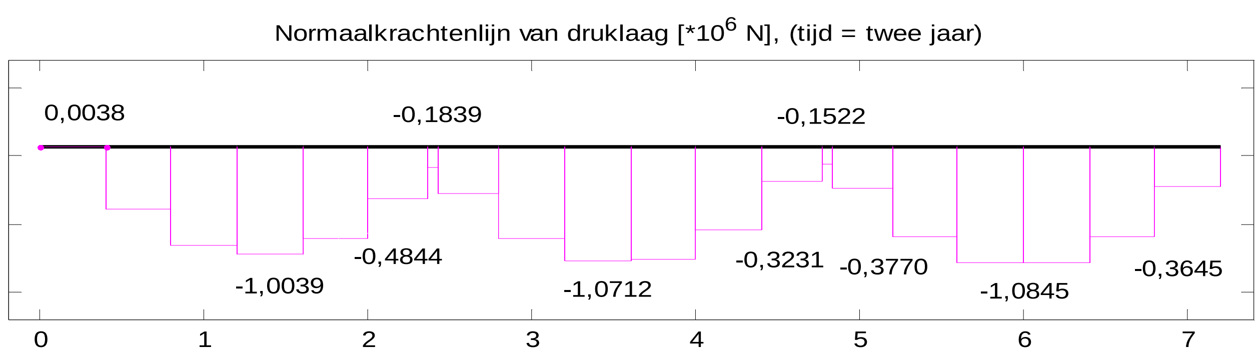
Hier worden de normaalkrachtlijnen van de voorspanelementen, voorspanliggers, druklaag en gehele constructie, de getekend na tweede jaar bekeken, zie figuur I.11 tot en met I.14. Tevens wordt hier de vervorming van de constructie en het verplaatsing- en tijddiagram van een aantal punten van de constructie geplot, zie figuur I.15 tot en met I.19. De plaatsen van deze punten zijn in figuur I.15 weergegeven.



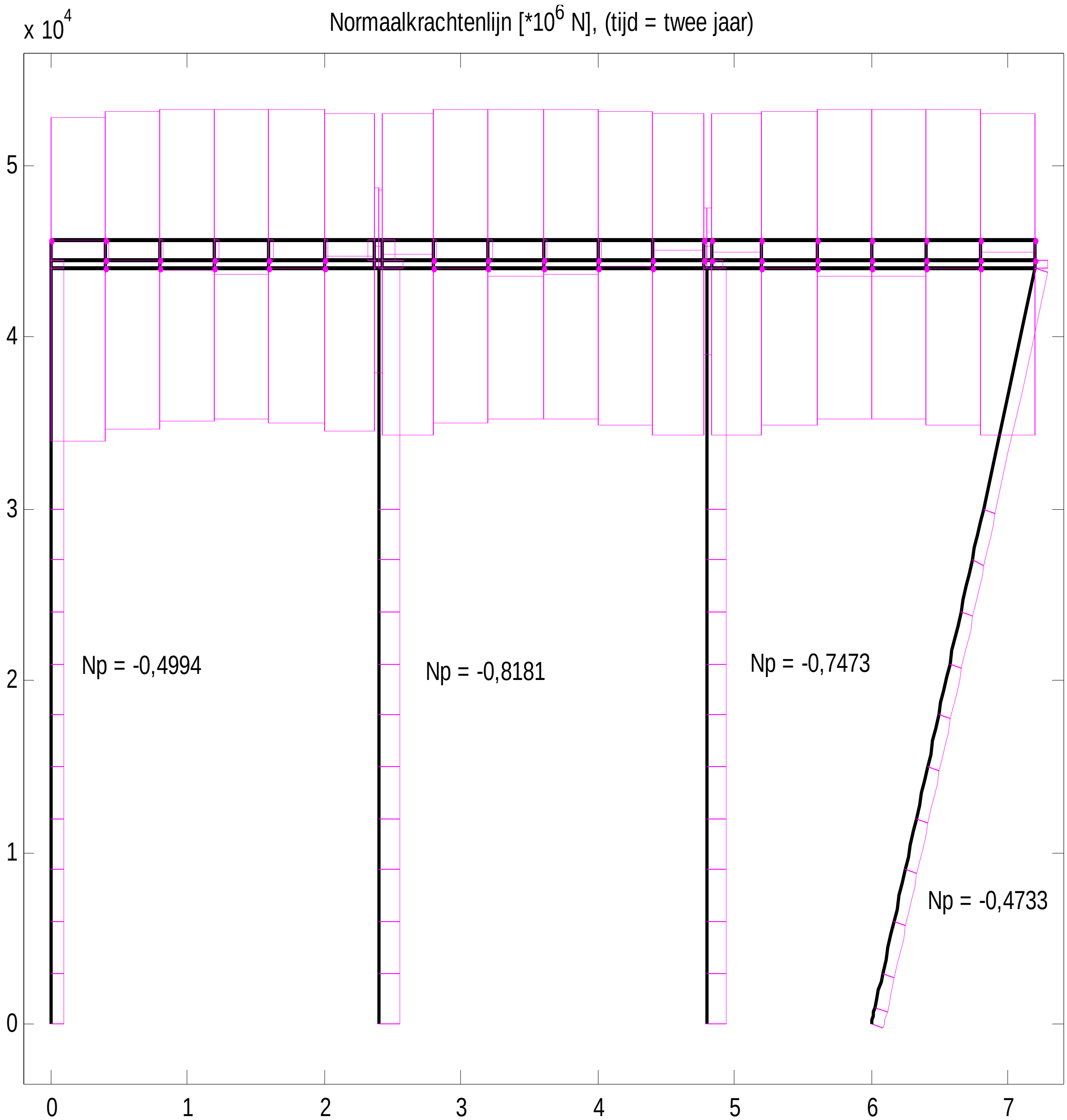
Figuur I.11: Normaalkrachtlijnen van voorspanelementen na tweede jaar



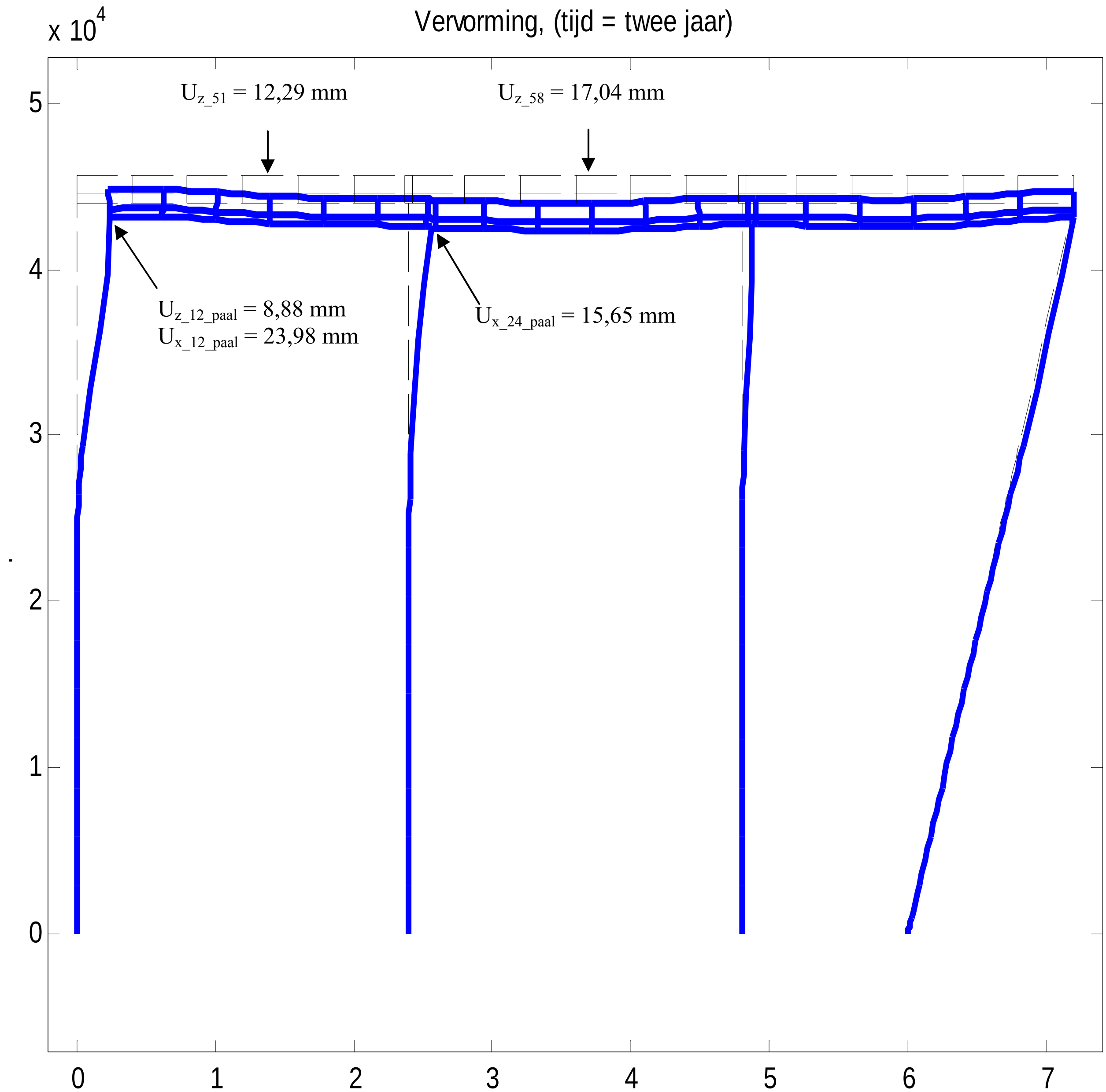
Figuur I.13: Normaalkrachtlijnen van de voorspanliggers na tweede jaar



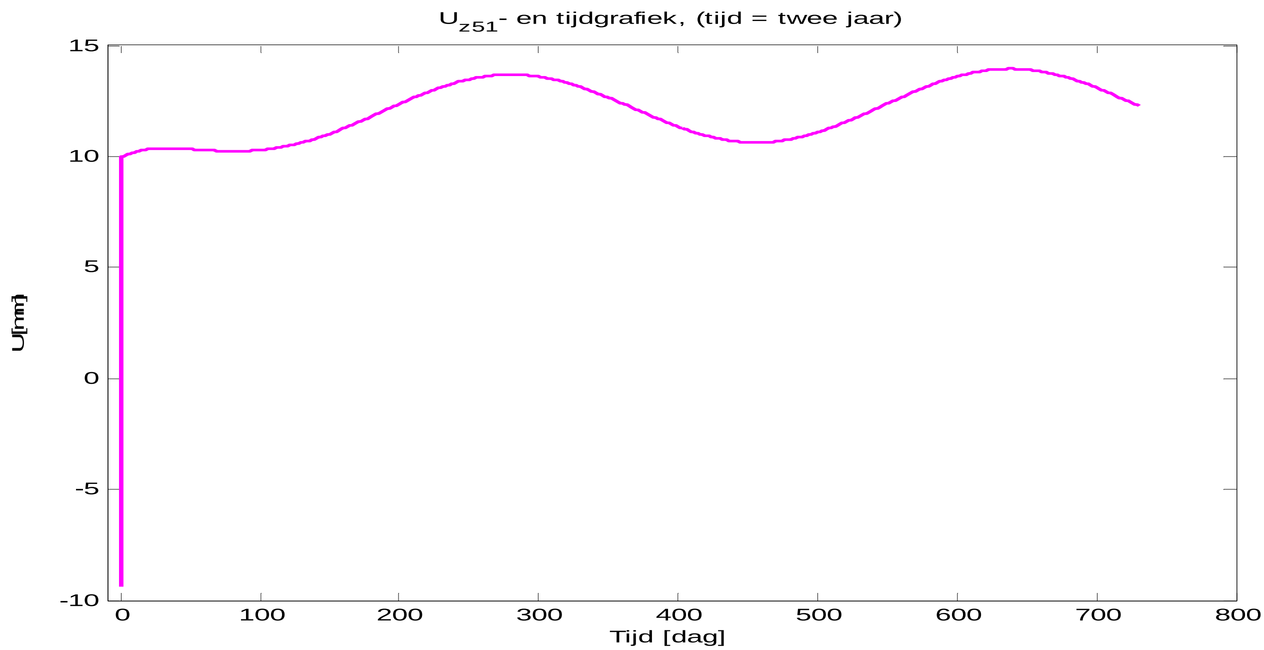
Figuur I.14: Normaalkrachtlijnen van de druklaag na tweede jaar



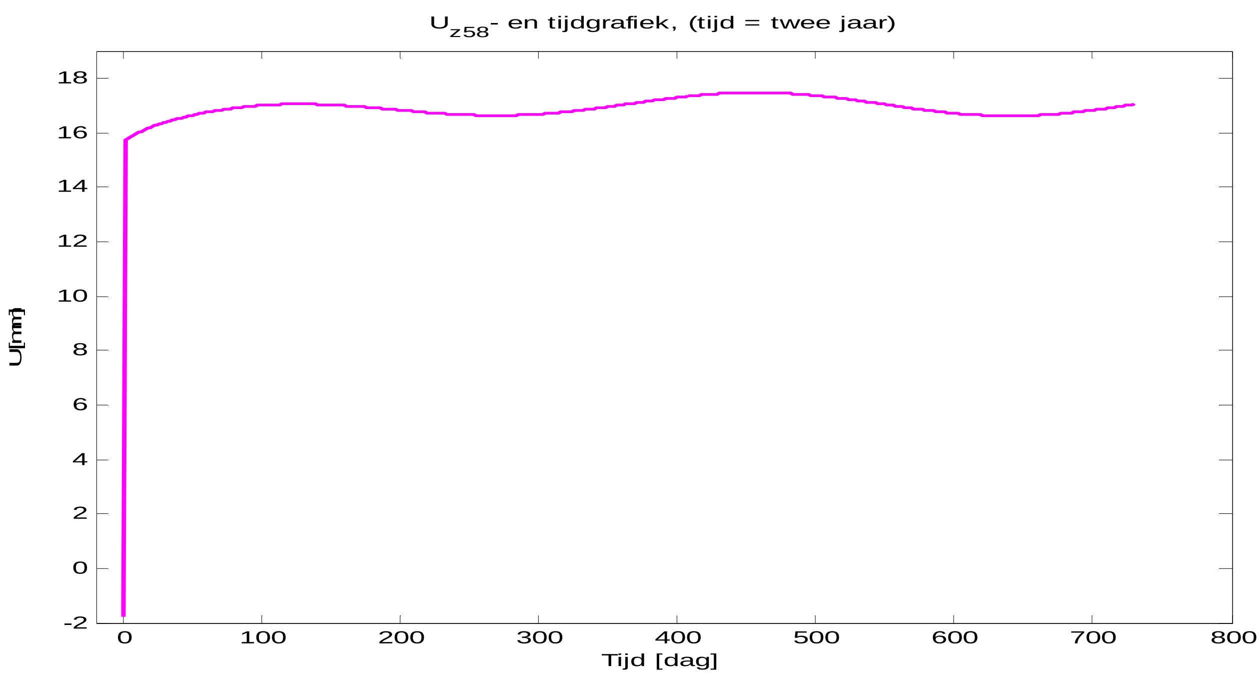
Figuur I.12: Normaalkrachtlijnen van de constructie na tweede jaar



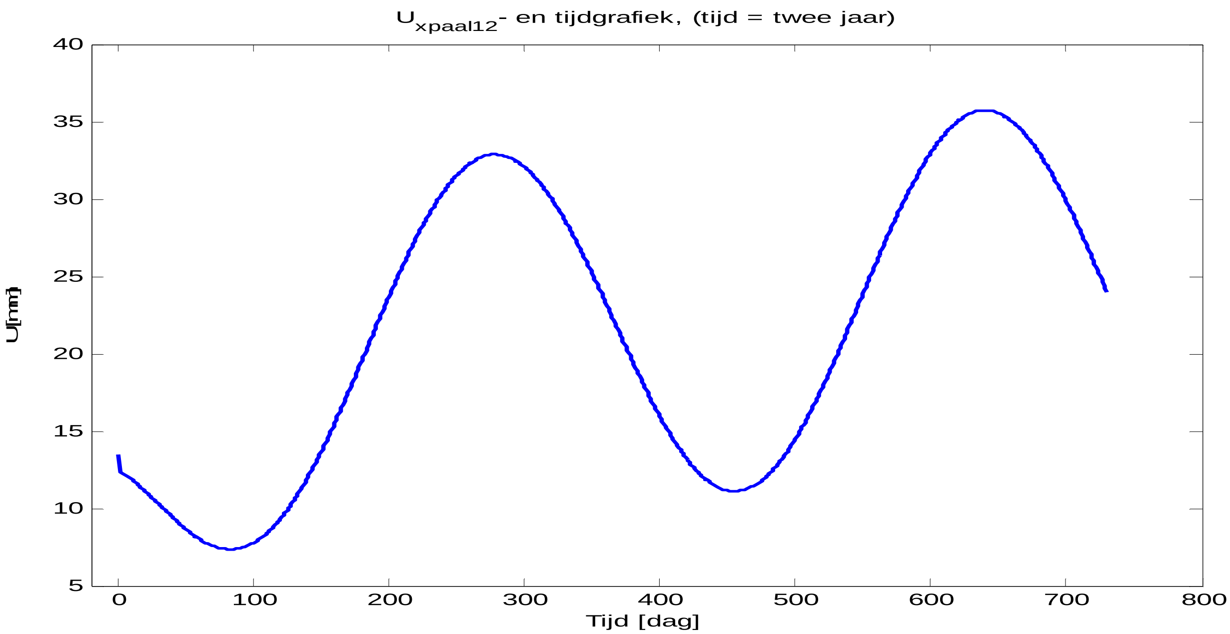
Figuur I.15: Vervorming van de constructie na tweede jaar



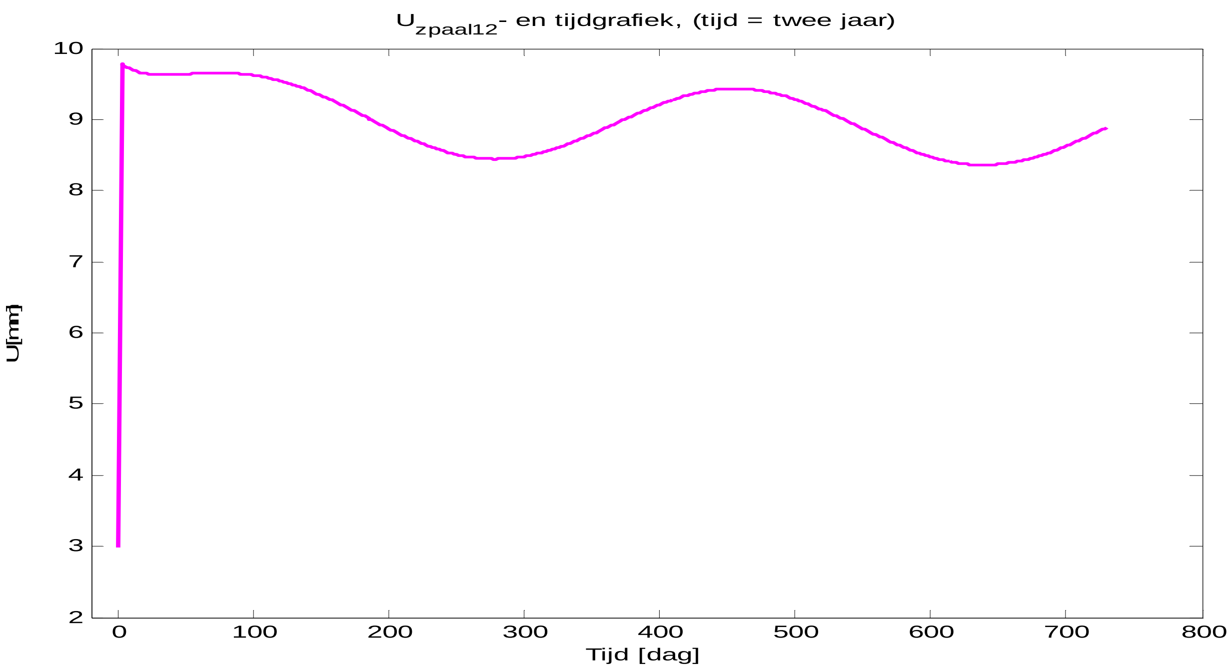
Figuur I.16: Verplaatsing (z)- en tijddiagram van het punt in het middel van de linker overspanning



Figuur I.17: Verplaatsing (z)- en tijddiagram van het middepunt van de middeloverspanning



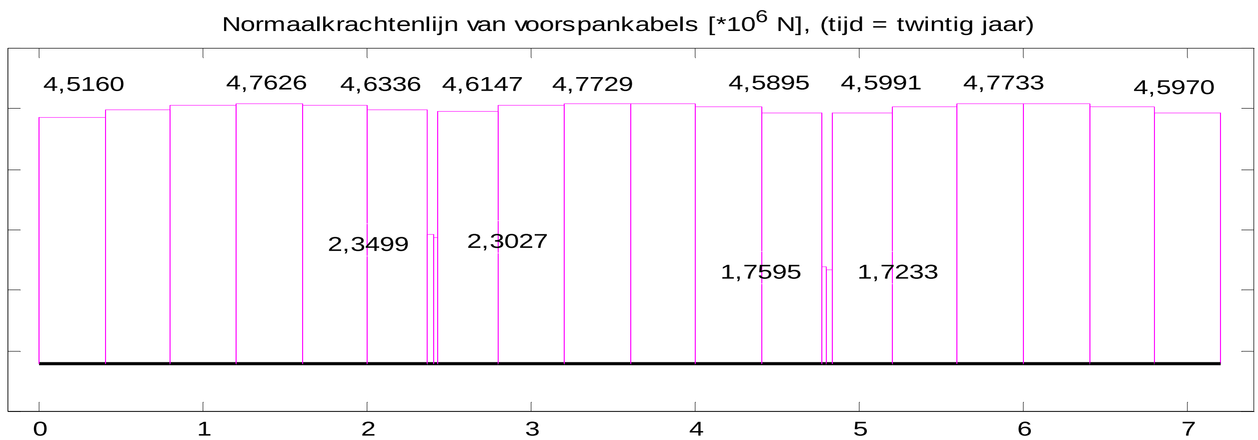
Figuur I.18: Verplaatsing (x)- en tijddiagram van het kruispunt van de linker overspanning en paal



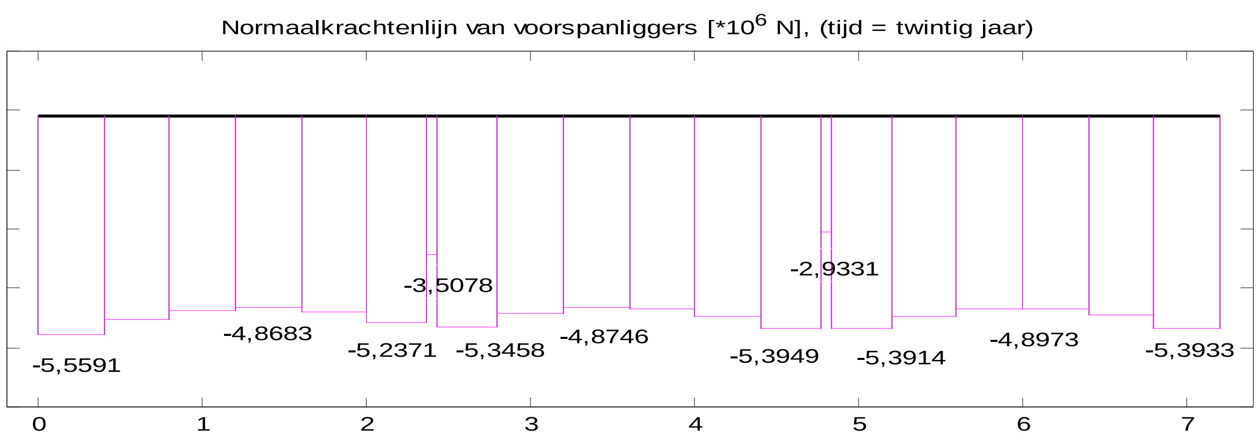
Figuur I.19: Verplaatsing (z)- en tijddiagram van het kruispunt van de linker overspanning en paal

Resultaten na het twintigste jaar

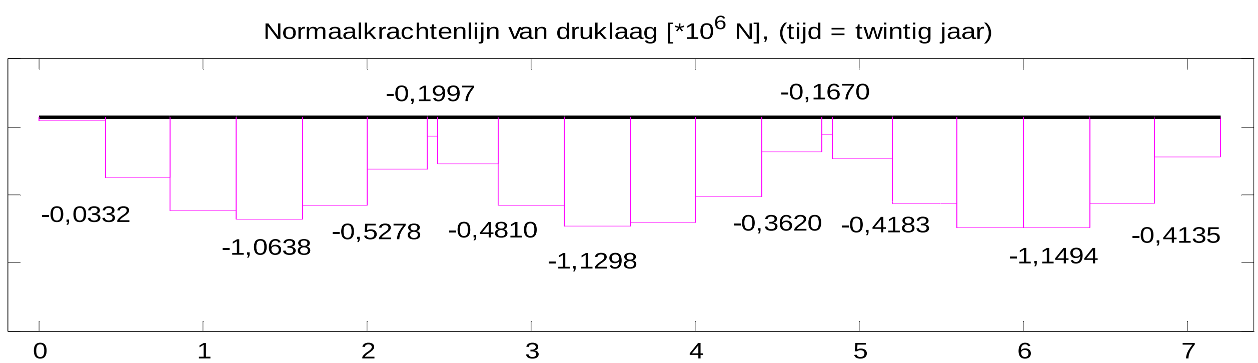
Hier wordt de normaalkrachtlijnen van de voorspanelementen, de gehele constructie, de voorspanliggers en de druklaag getekend na twintig jaar bekeken, zie figuur I.20 tot en met I.23. Tevens wordt hier de vervorming van de constructie en het verplaatsing- en tijddiagram van een aantal punten van de constructie geplot, zie figuur I.24 tot en met I.28. De plaatsen van deze punten zijn in figuur I.24 weergegeven.



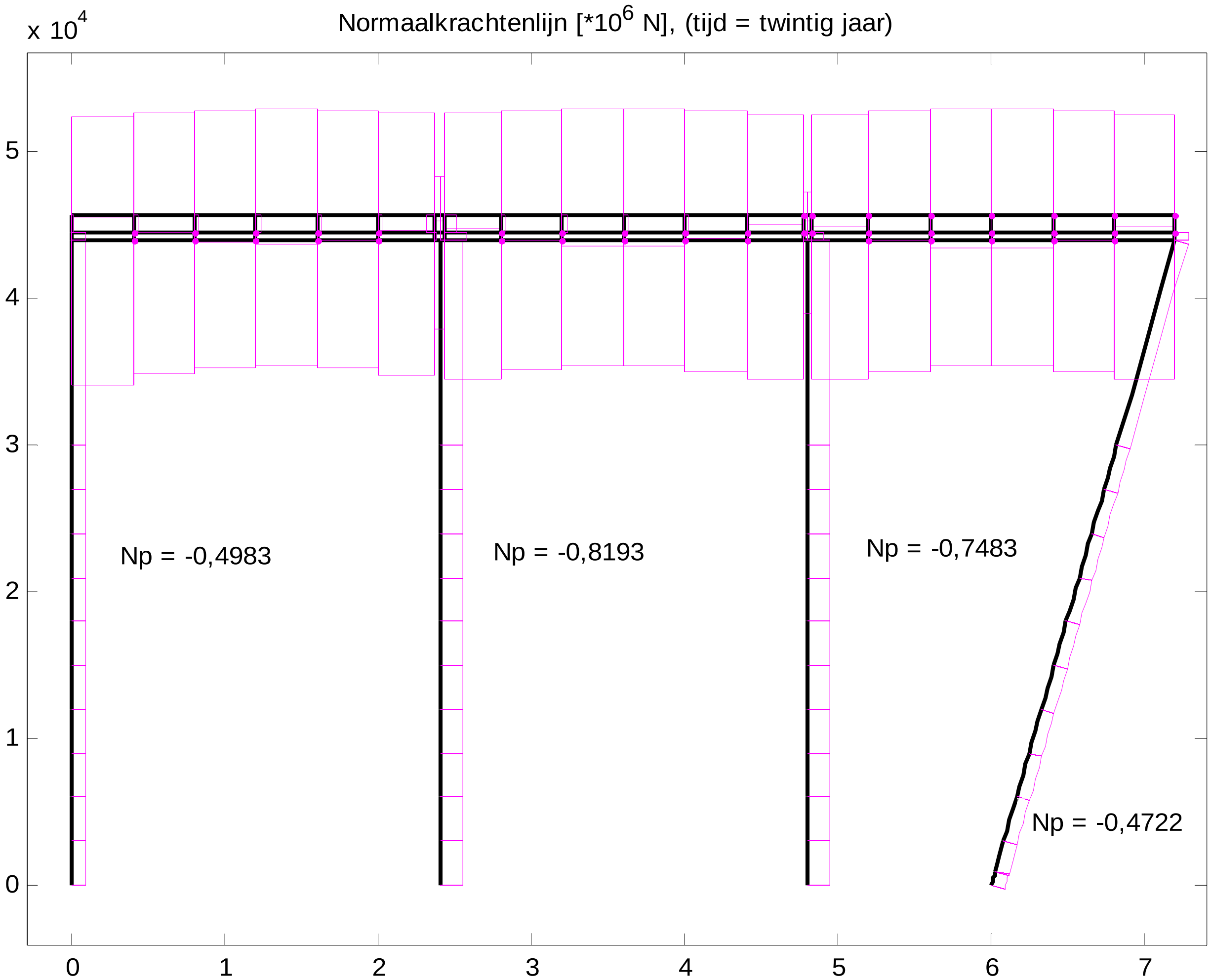
Figuur I.20: Normaalkrachtlijnen van de kabels na twintig jaar



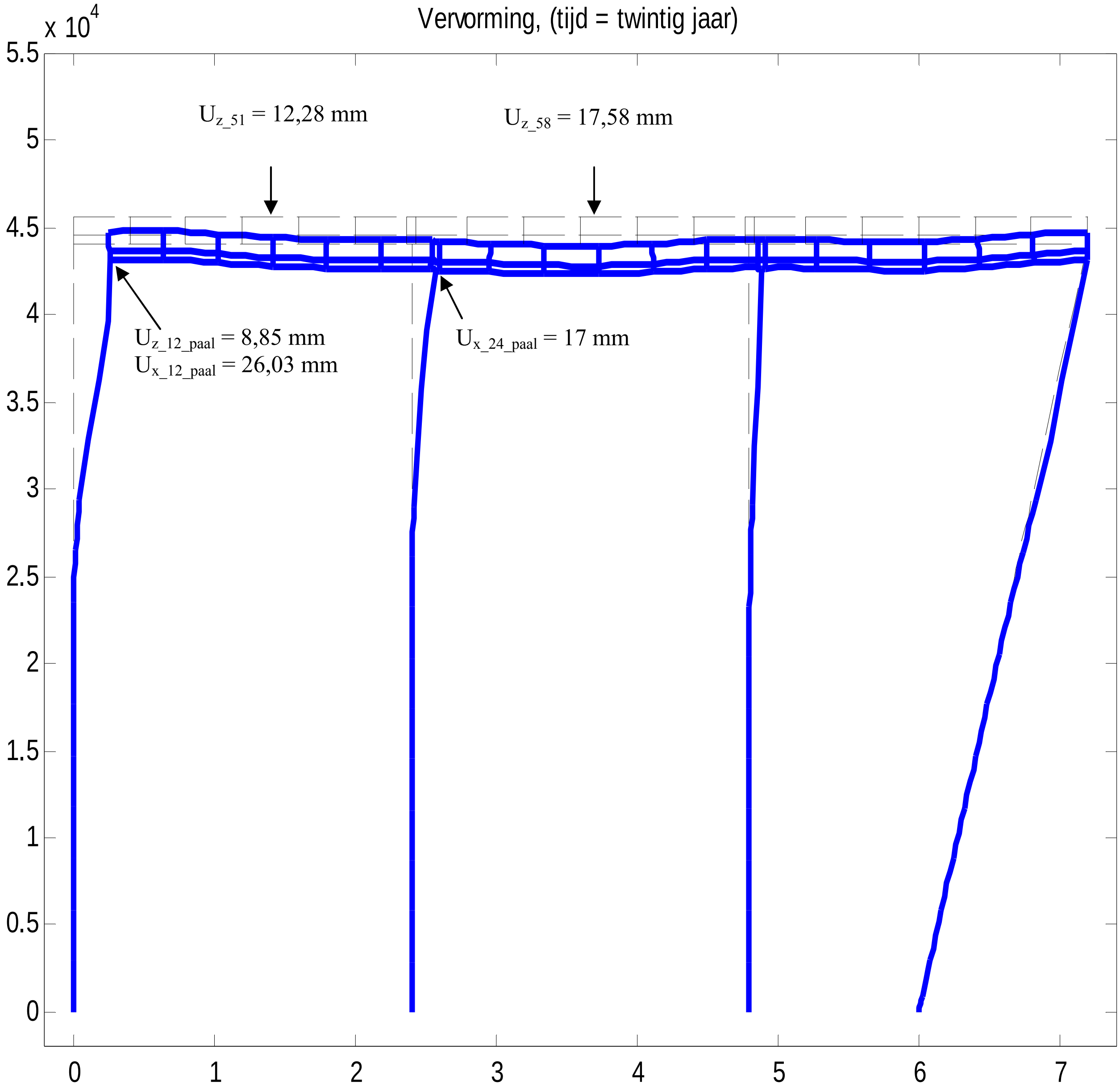
Figuur I.21: Normaalkrachtlijnen van de voorspanliggers na twintig jaar



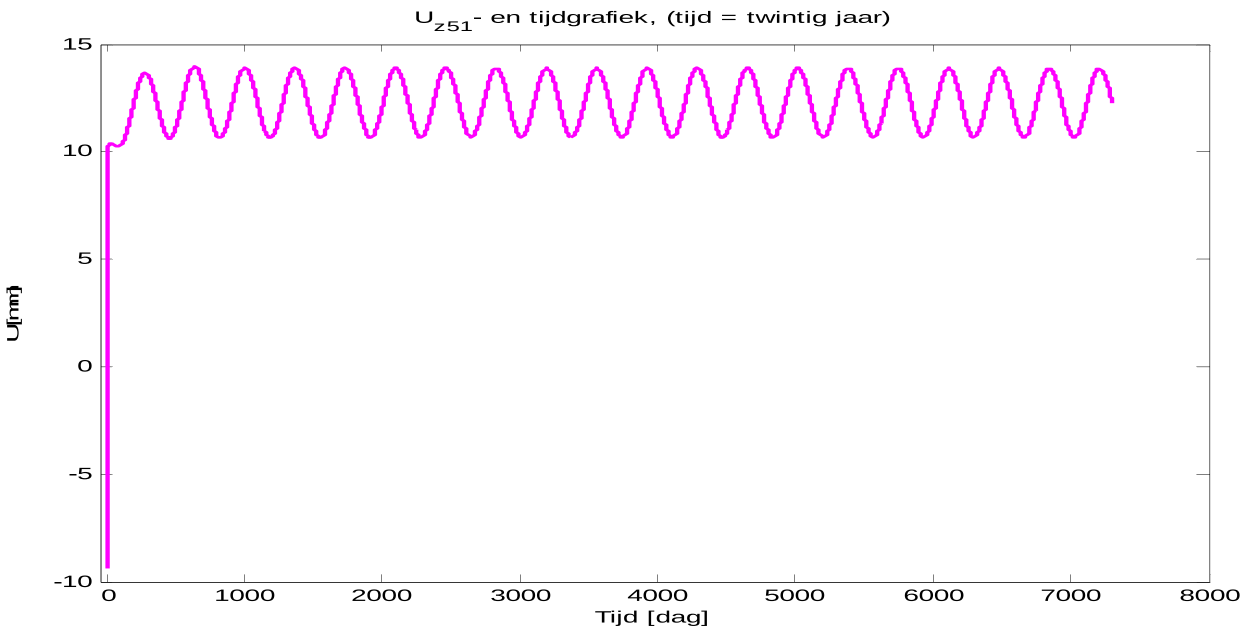
Figuur I.22: Normaalkrachtlijnen van de druklaag na twintig jaar



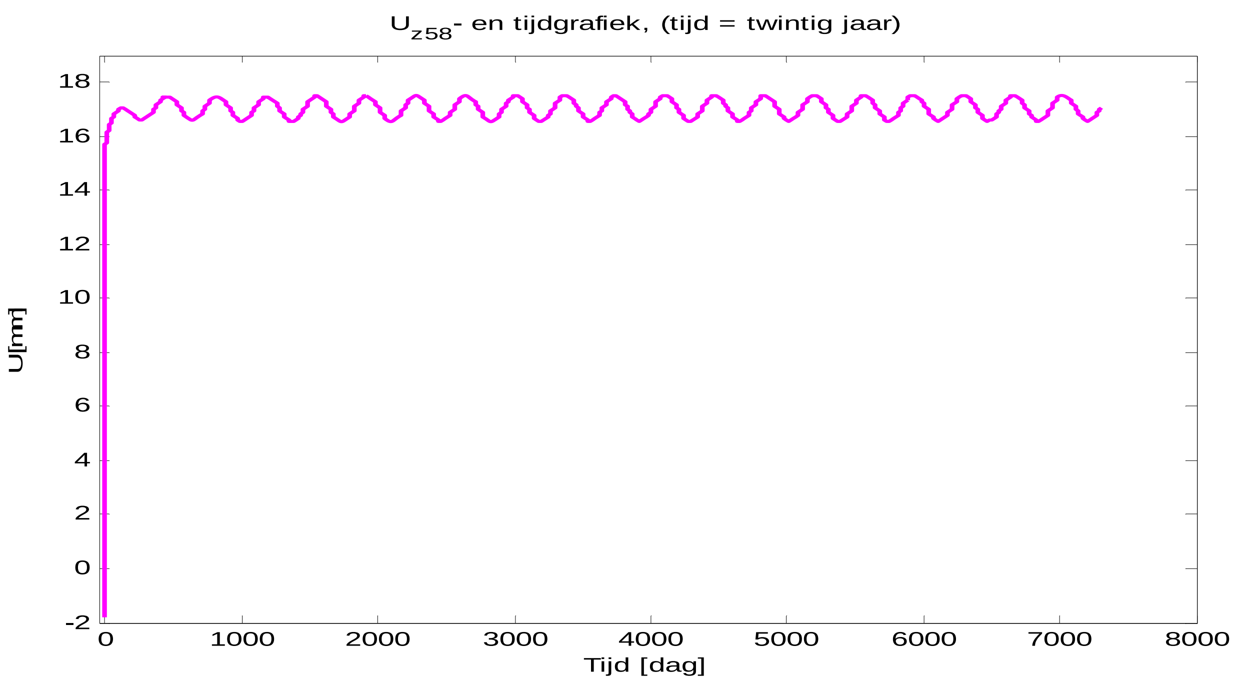
Figuur I.23: Normaalkrachtlijnen van de constructie na twintig jaar



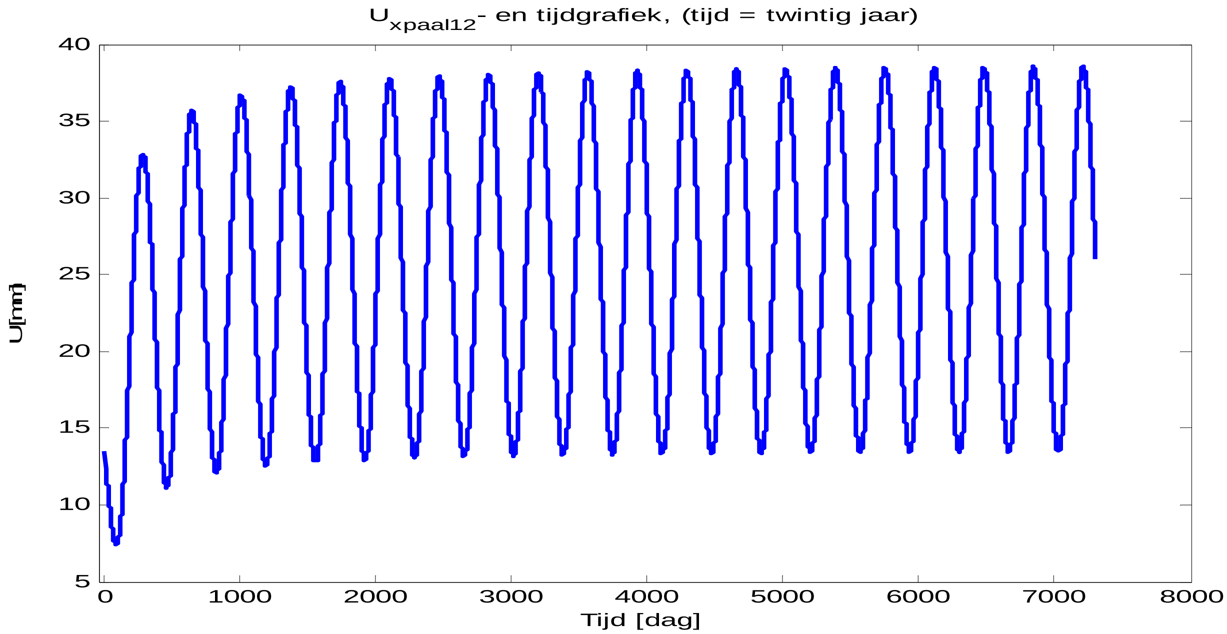
Figuur I.24: Vervorming van de constructie na twintig jaar



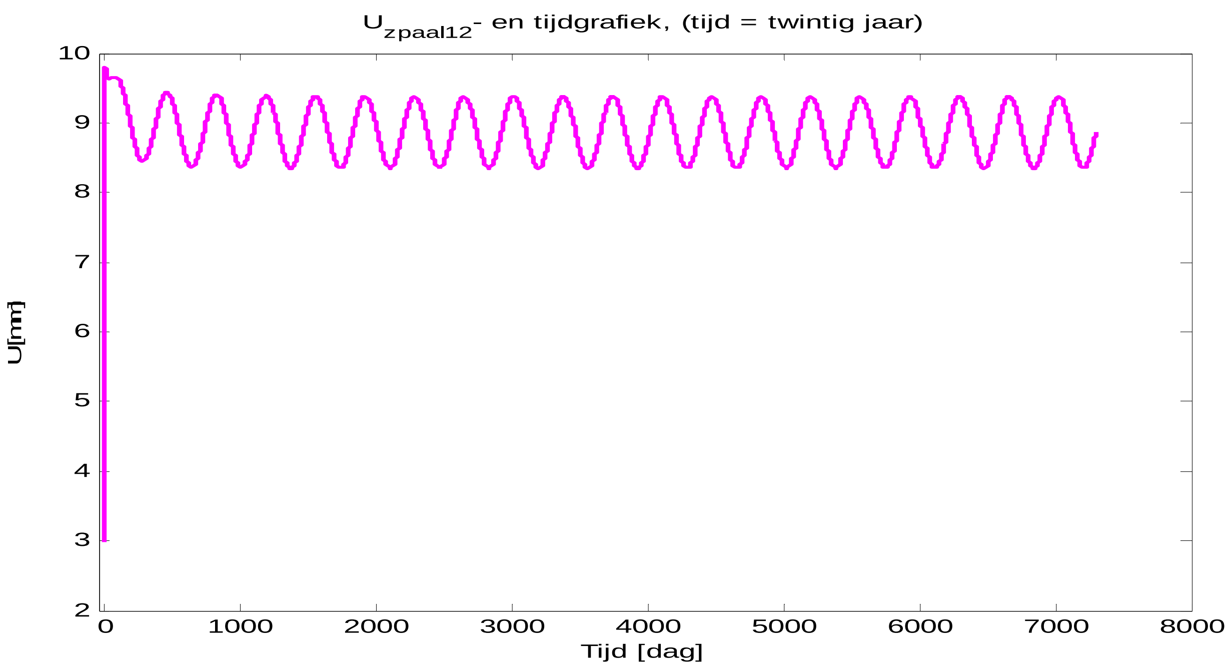
Figuur I.25: Verplaatsing (z)- en tijddiagram van het punt in het middel van de linker overspanning



Figuur I.26: Verplaatsing (z)- en tijddiagram van het middelpunt van de middeloverspanning



Figuur I.27: Verplaatsing (x)- en tijddiagram van het kruispunt van de linker overspanning en paal

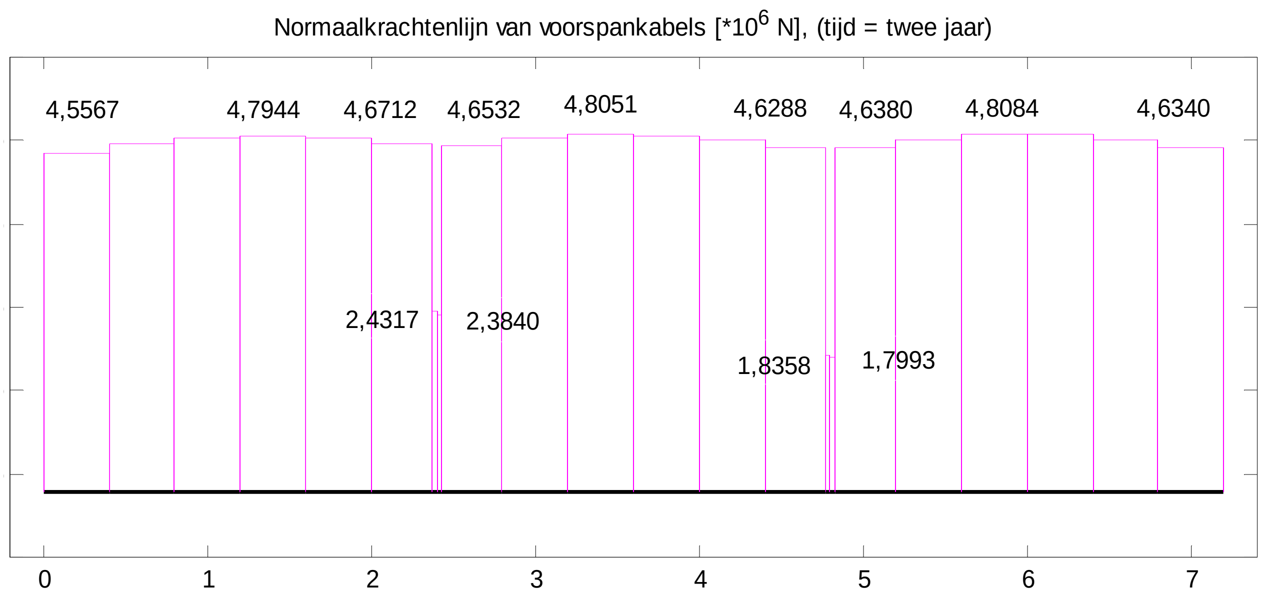


Figuur I.28: Verplaatsing (z)- en tijddiagram van het kruispunt van de linker overspanning en paal

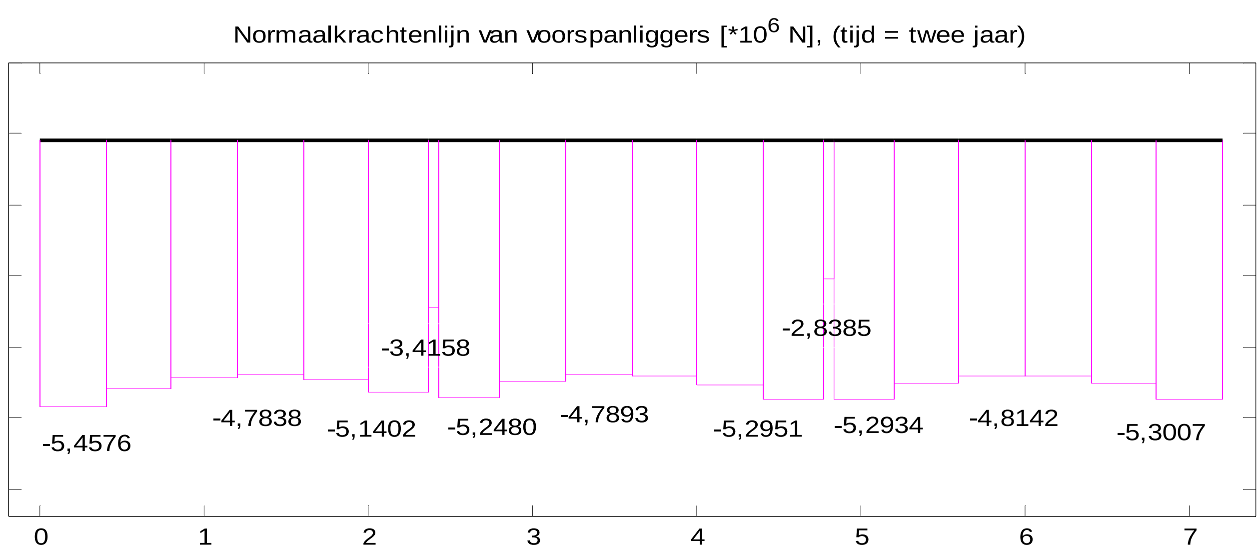
Dagelijkse temperatuurinvloed op berekeningen

De formules van de krimp en de kruip zijn afhankelijk van dag. Maar de formules van het temperatuureffect is afhankelijk van de dag en van het uur. Dagelijkse

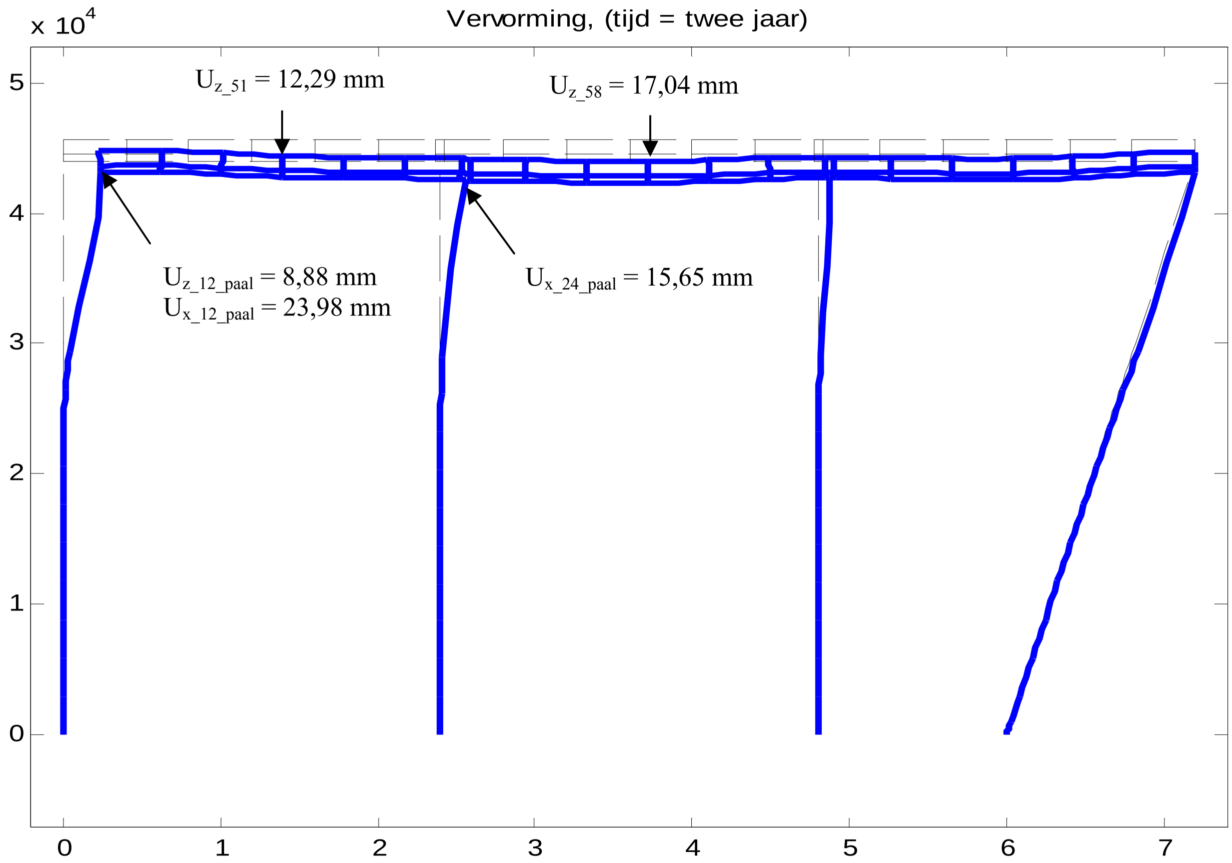
temperatuurwisseling zou in dit model geen invloed op de berekeningen hebben. Dus er worden tot nu toe alle resultaten per dag berekend omdat het proces heel veel sneller uitgewerkt worden. De juistheid van het berekende resultaten per dag kan met behulp van een voorbeeld getoetst worden. Hier is normaalkrachtlijnen van de voorspankabels en de voorspanliggers na twee jaar te zien. Tevens zijn de vervorming van de gehele constructie en het verplaatsingverloop van het maximum verplaatste punt van de constructie weergegeven. De resultaten worden per uur berekend. Er is naar verwachting geen verschil tussen antwoorden van beide gevallen.
Hier is de resultaten van de dagelijkse temperatuurinvloed op de constructie te zien.



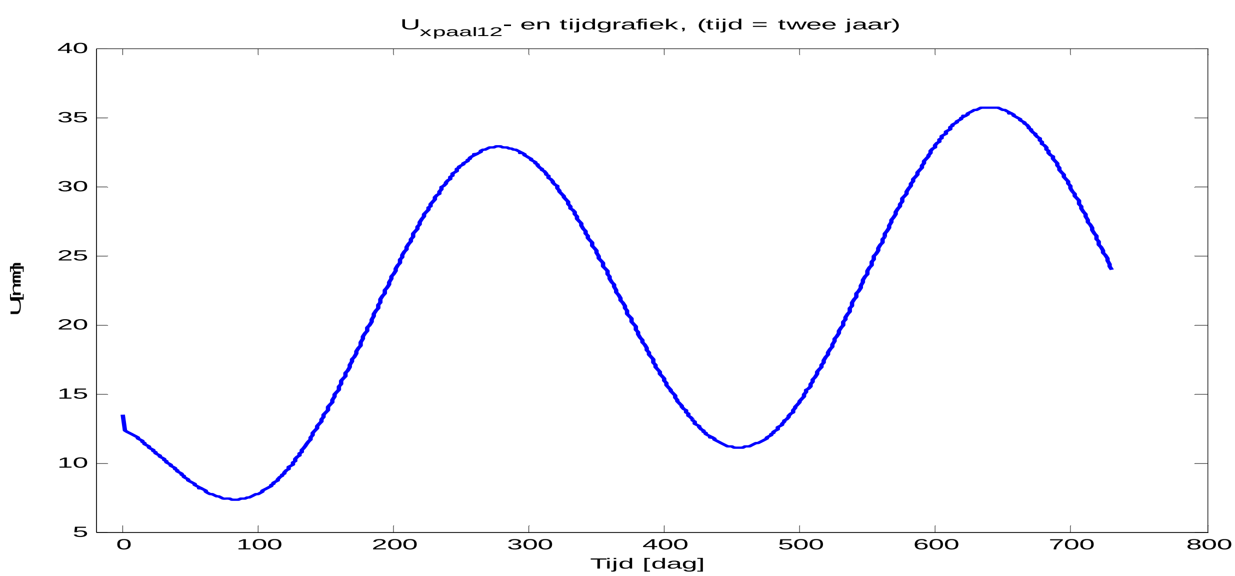
FiguurI.29: Normaalkrachtlijnen van voorspankabels na tweede jaar



Figuur I.30: Normaalkrachtlijnen van voorspanligger na tweede jaar



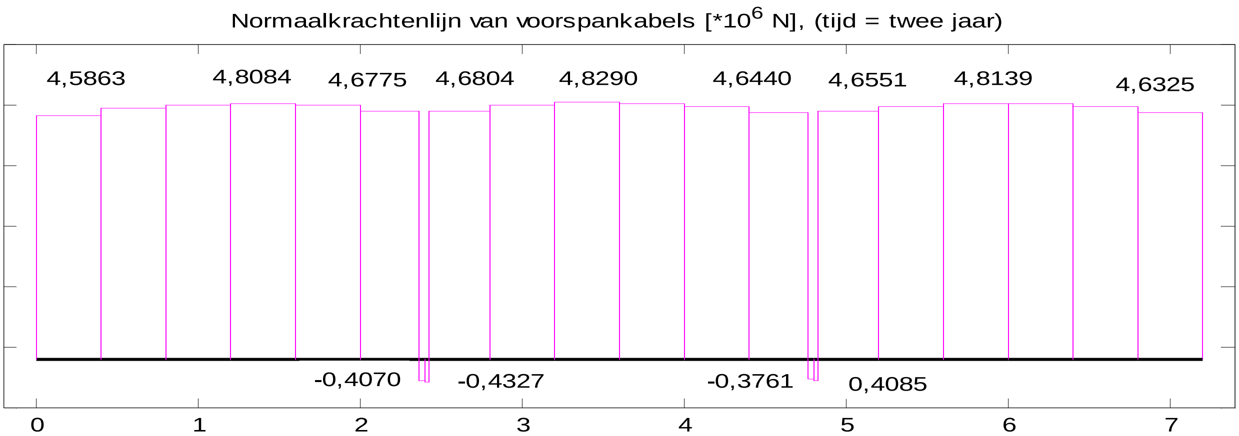
Figuur I.31: Vervorming van constructie na tweede jaar



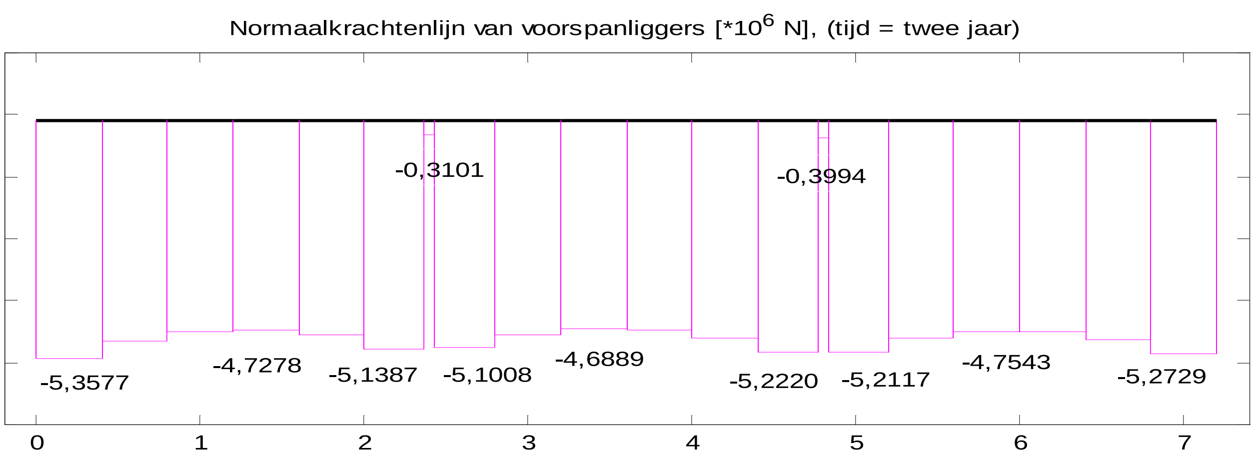
Figuur I.32: Verplaatsing (x)- en tijddiagram van het kruispunt van de linker overspanning en paal

Invloed van verbindingstype op berekeningen

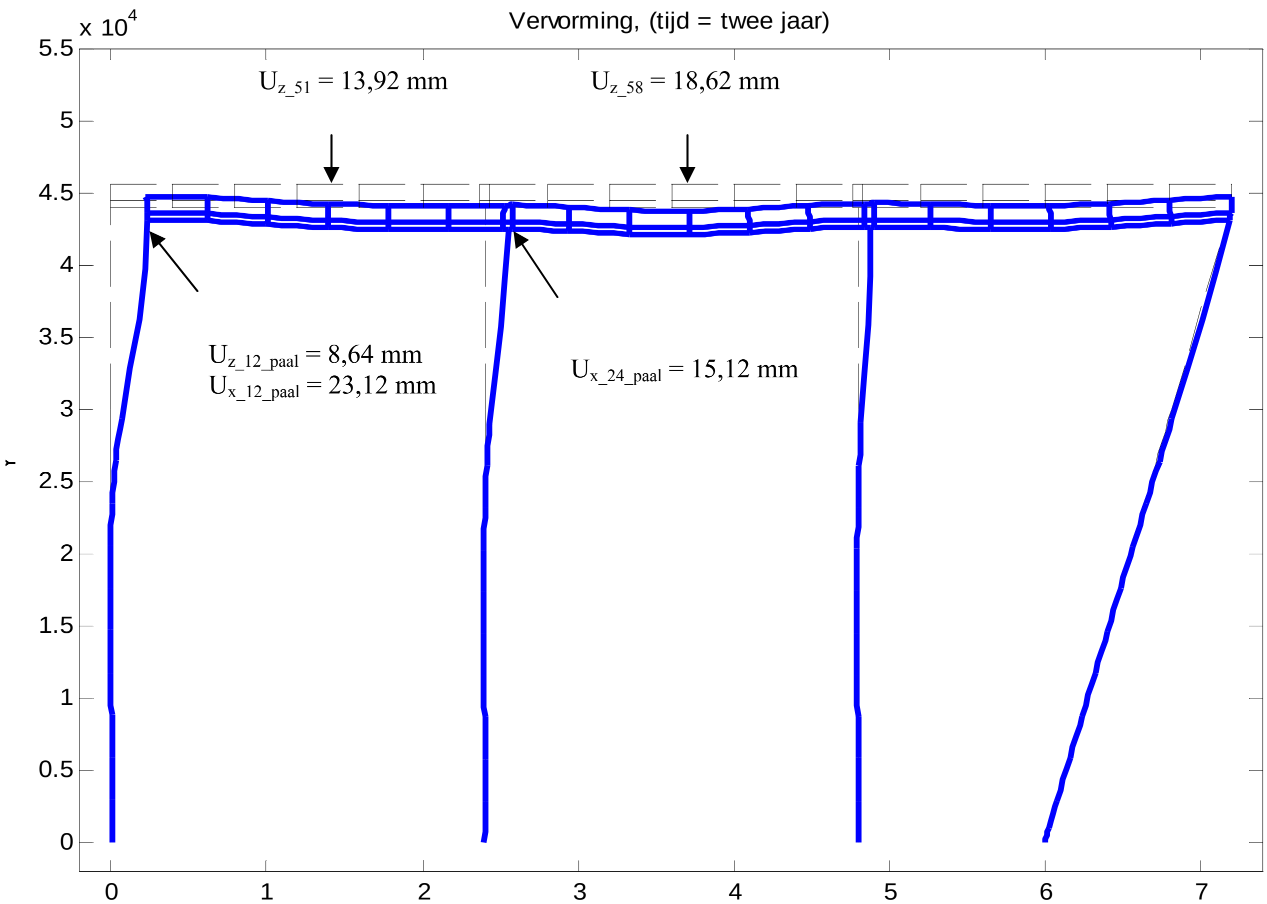
In het model zijn scharnierende verbinding tussen liggers en palen (figuur I.4) aangebracht. Hier wordt dezelfde constructie met momentvaste verbindingen gemodelleerd. Dus in het nieuwe model blijven alle afmetingen en grootheden dezelfde als in model 2. De normaalkrachtlijnen van de voorspankabels en de voorspanliggers zijn berekend na twee jaar. Tevens zijn de vervorming van de gehele constructie en verplaatsing- en tijdgrafiek van het maximum verplaatste punt in bijlage K weergegeven. Deze resultaten worden met de resultaten van de paragraaf I.4 vergeleken. Het verschil van de normaalkracht van de voorspanliggers en van de voorspankabels is minder dan 2% in de beide gevallen. Het verschil van de vervorming van de gekozen punten is minder dan 9% in de beide gevallen. Maar het verschil van normaalkrachten in de verbindingen is bijna 90% in de beide gevallen.
Hier is de invloed van het verbindingstype op de berekeningen te zien.



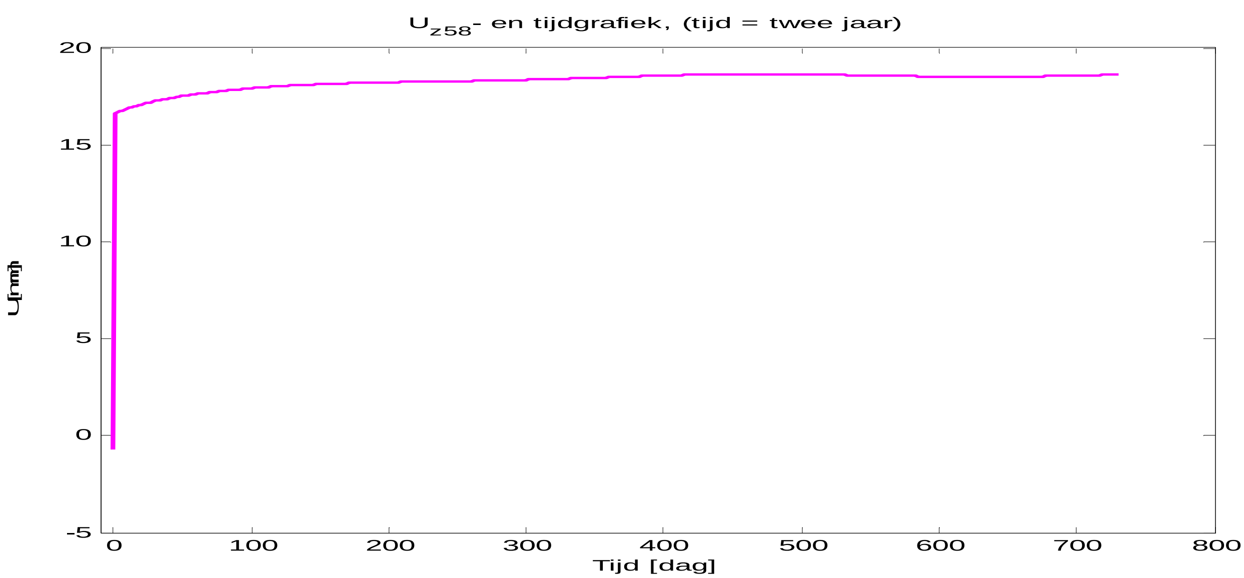
Figuur I.33: Normaalkrachtlijnen van voorspankabels na tweede jaar



Figuur I.34: Normaalkrachtlijnen van voorspanligger na tweede jaar



Figuur I.34: Vervorming van constructie na tweede jaar



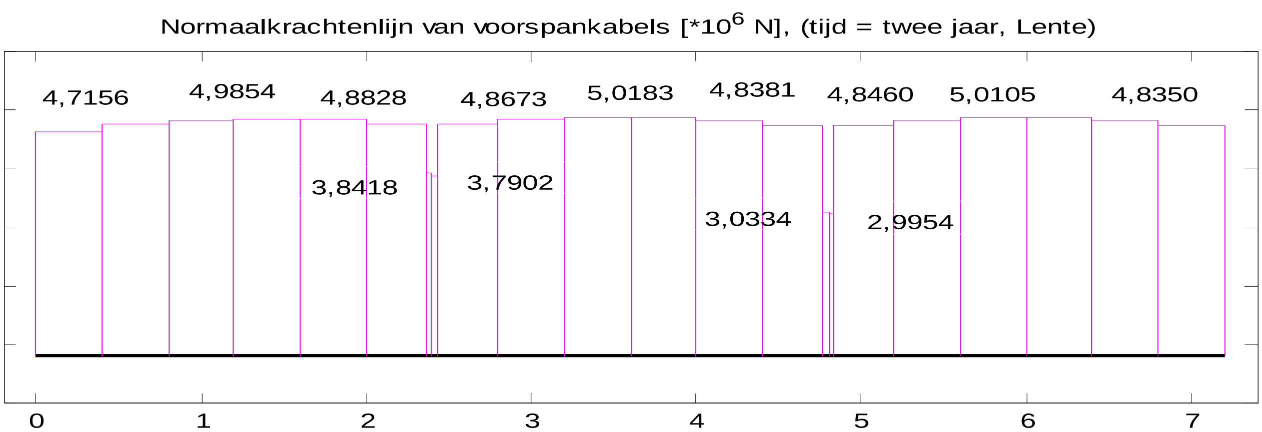
Figuur I.35: Verplaatsing (z)- en tijddiagram van het middelpunt van de middeloverspanning

Temperatuurinvloed van elke seizoen op berekeningen

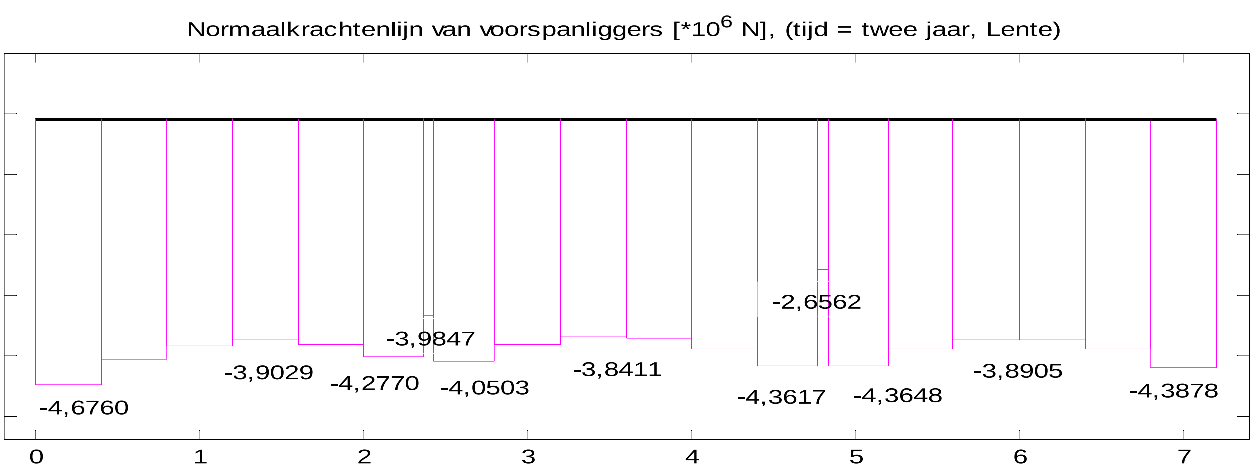
Hier wordt de constructie in elk seizoen tussen het tweede en derde jaar behandel. De resultaten aan het begin van het tweede jaar is in de paragraaf I.4 behandeld. Hier is de normaalkrachtlijnen van de voorspanelementen en voorspanliggers en tevens vervorming van de constructie in de vier seizoenen te zien.

Uit de resultaten worden geconcludeerd dat het grootste voorspankrachtsverlies aan het eind van de herfst voorkomt.

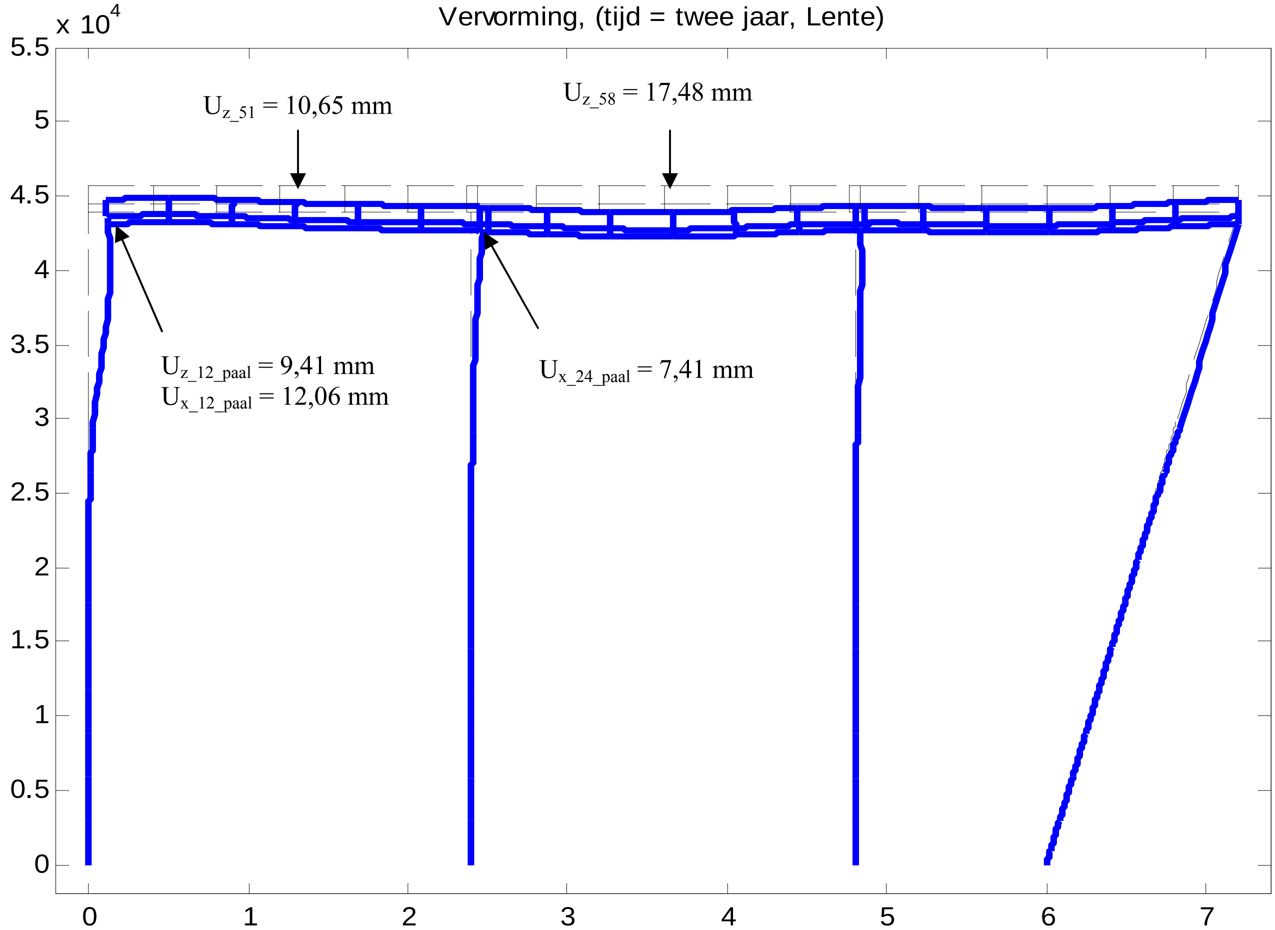
1- De resultaten zijn in figuur I.36 tot en met figuur I.40 aan het eind van het eerste seizoen weergegeven:



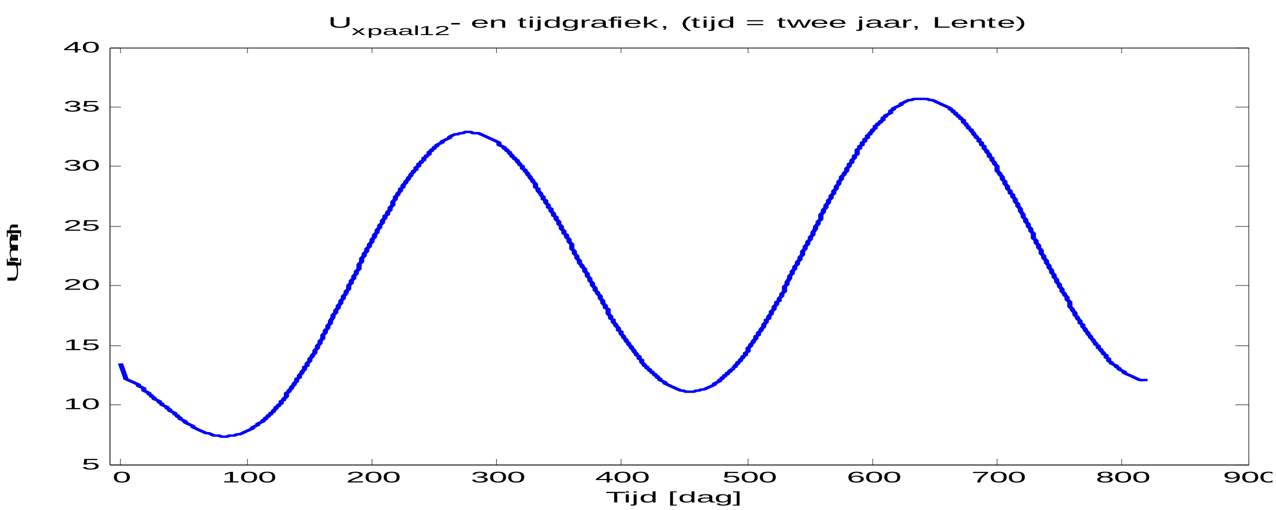
Figuur I.36: Normaalkrachtlijnen van voorspankabels na tweede jaar



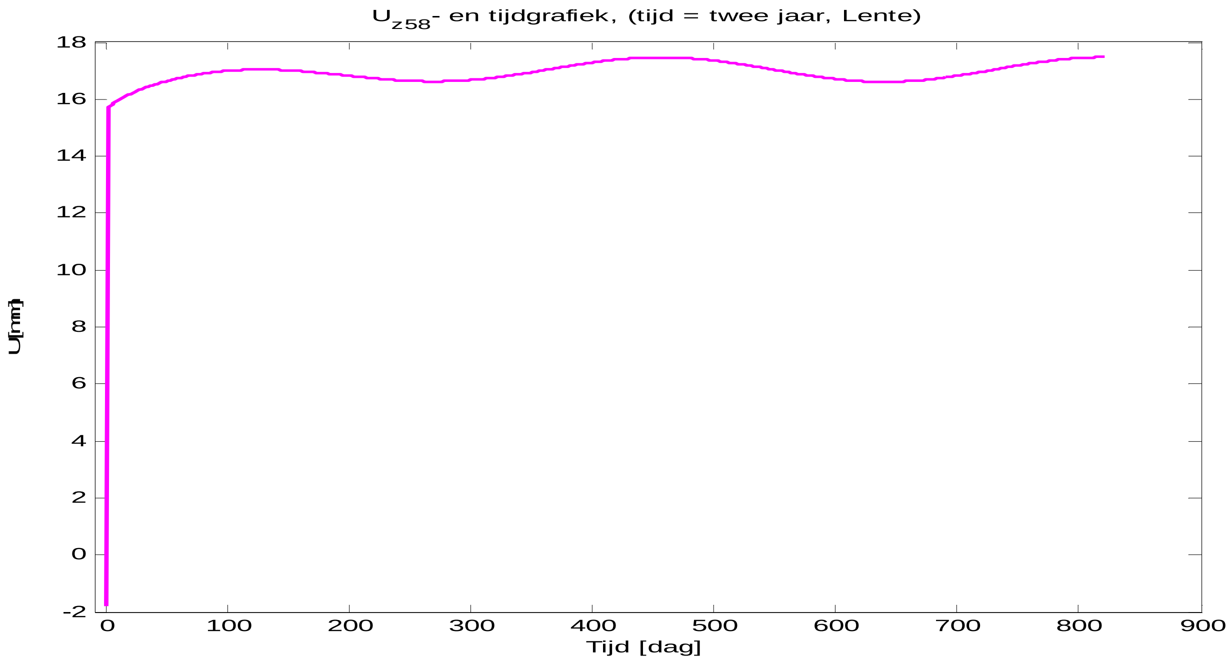
Figuur I.37: Normaalkrachtlijnen van voorspanligger na tweede jaar



Figuur I.38: Vervorming van constructie na tweede jaar

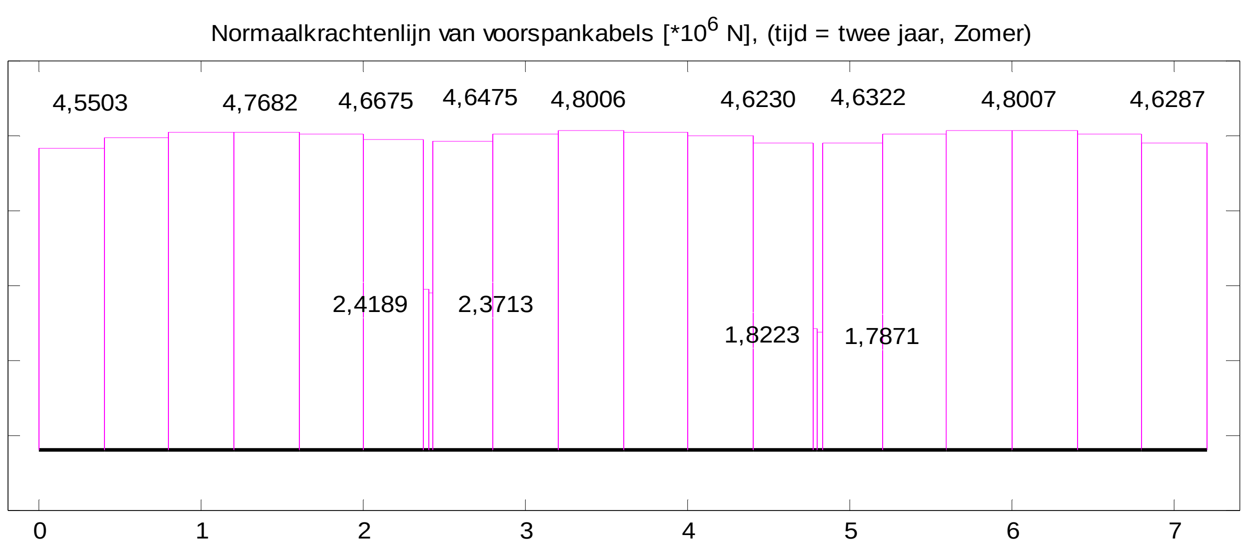


Figuur I.39: Verplaatsing (x)- en tijddiagram van het kruispunt van de linker overspanning en paal

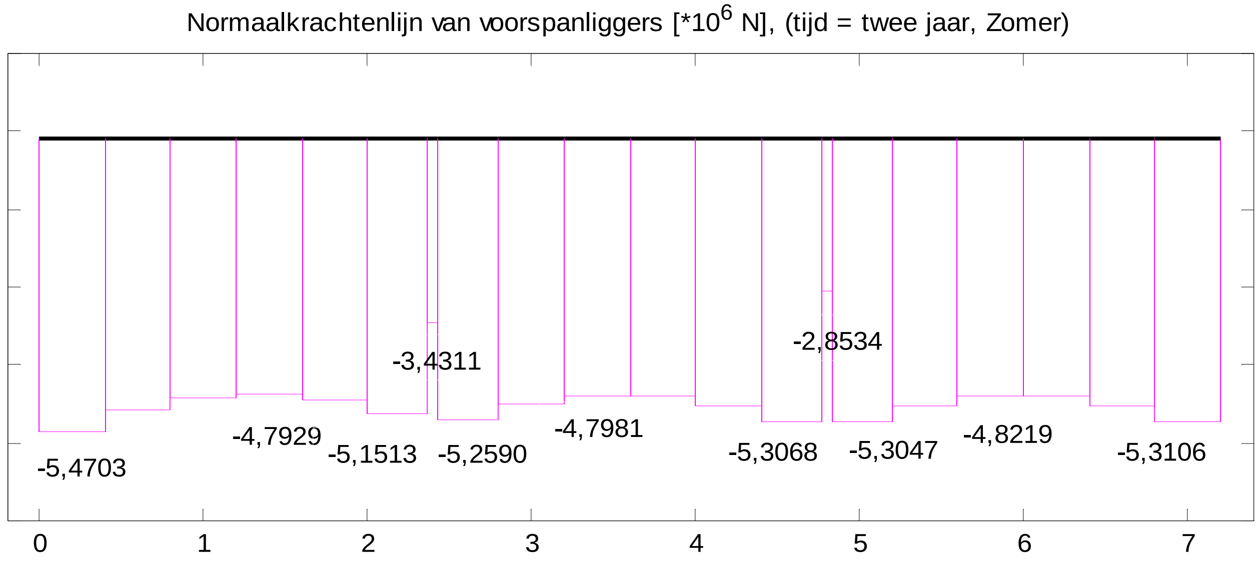


Figuur I.40: Verplaatsing (z)- en tijddiagram van het middelpunt van de middeloverspanning

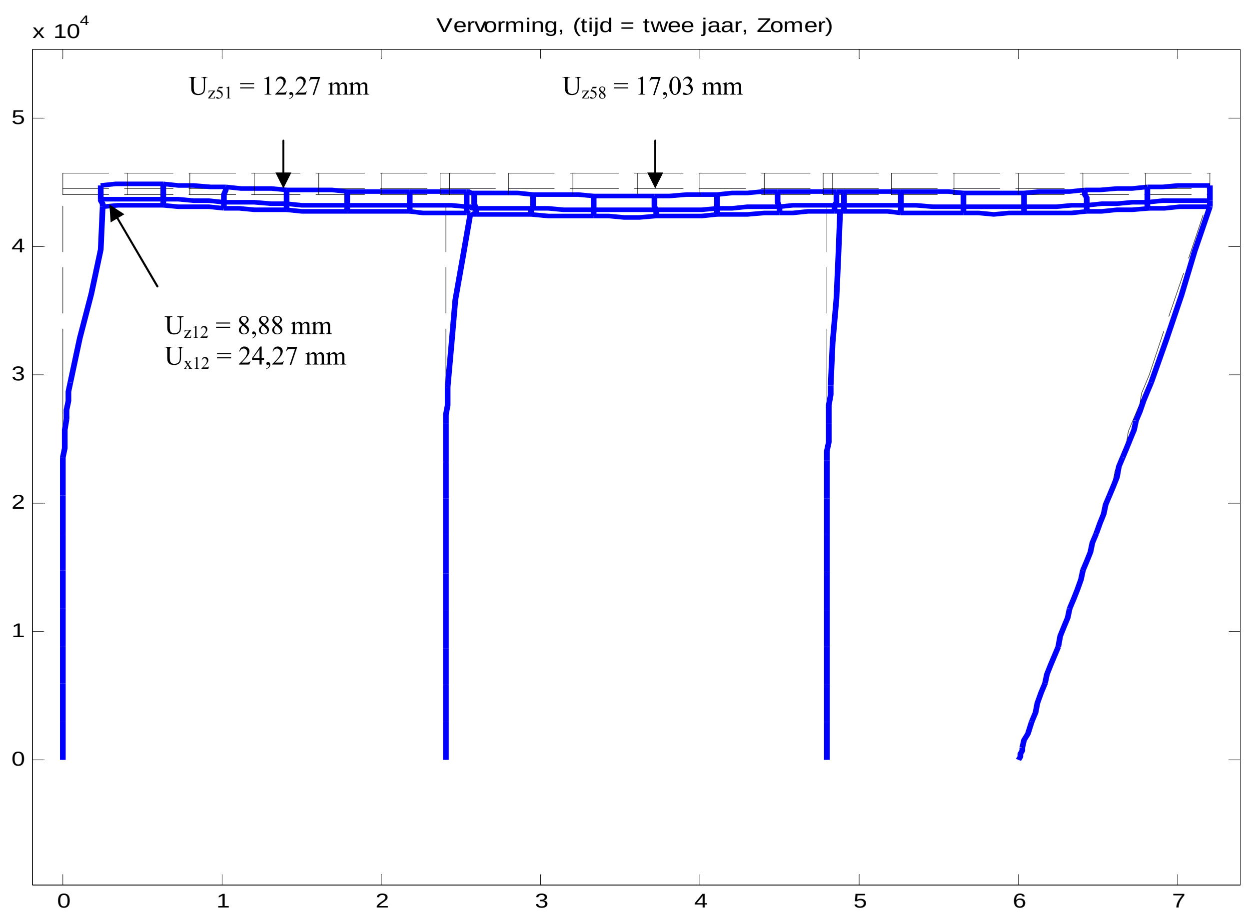
2- De resultaten zijn in figuur I.41 tot en met figuur I.45 aan het eind van het tweede seizoen weergegeven:



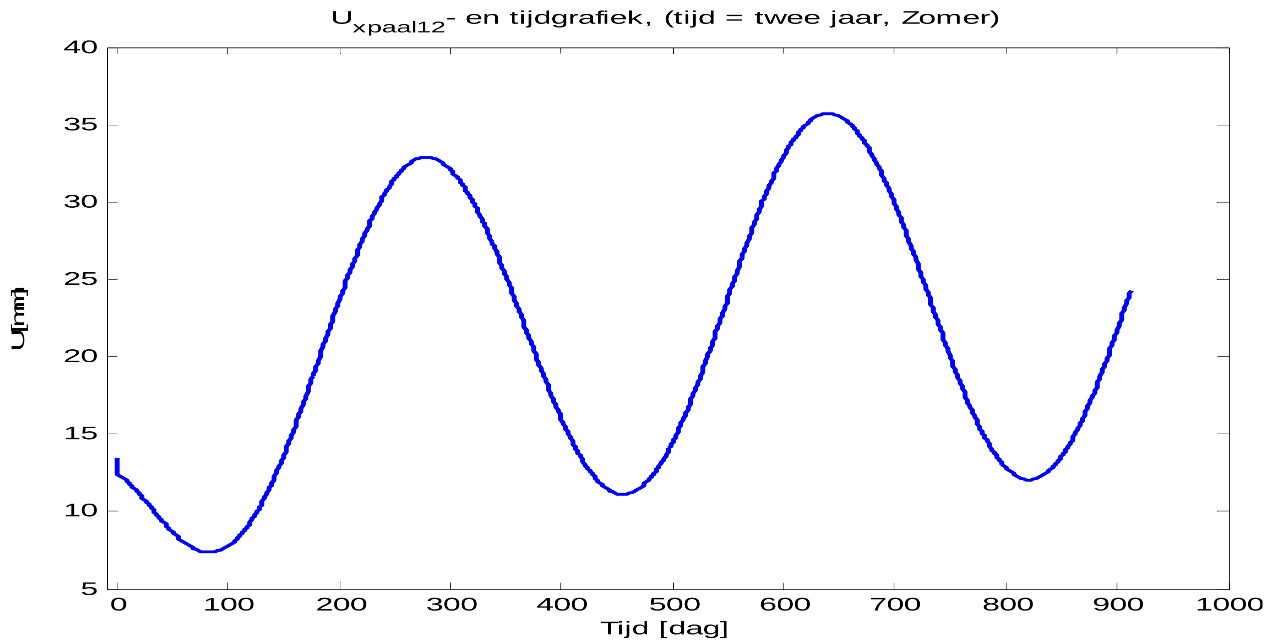
Figuur I.41: Normaalkrachtlijnen van voorspankabels na tweede jaar



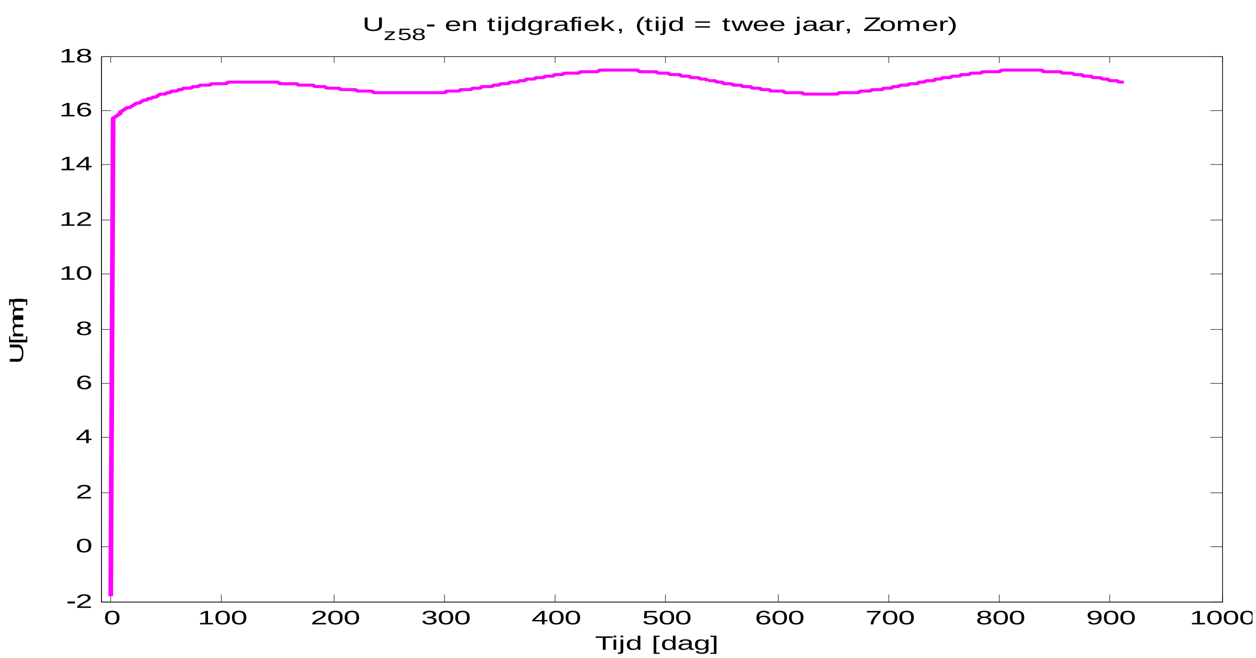
Figuur I.42: Normaalkrachtlijnen van voorspanligger na tweede jaar



Figuur I.43: Vervorming van constructie na tweede jaar



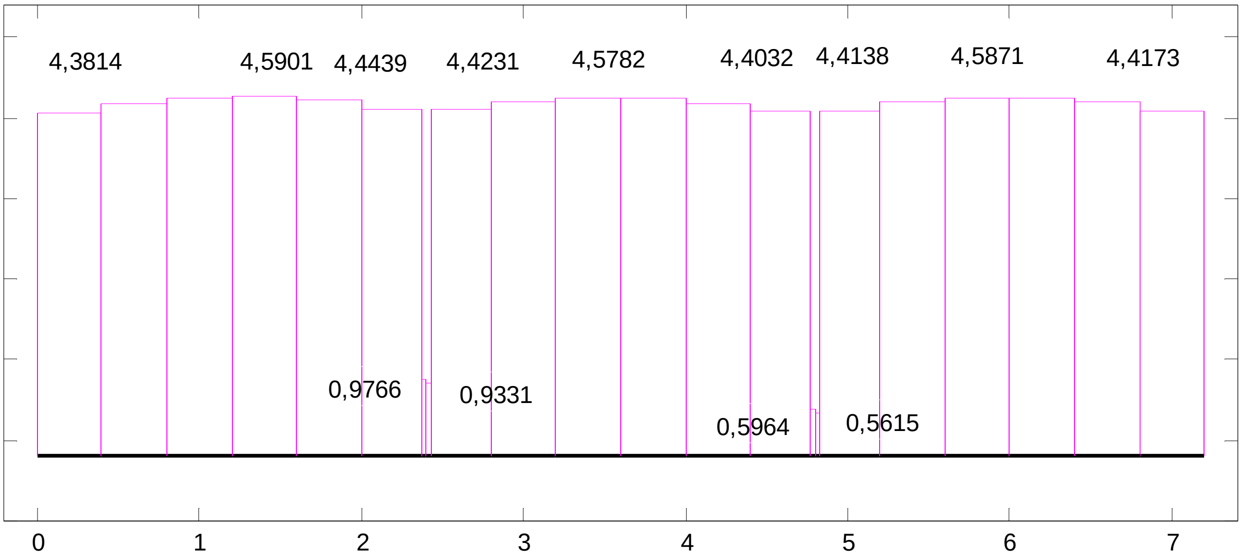
Figuur I.44:: Verplaatsing (x)- en tijddiagram van het kruispunt van de linker overspanning en paal



Figuur I.45: Verplaatsing (z)- en tijddiagram van het middelpunt van de middeloverspanning

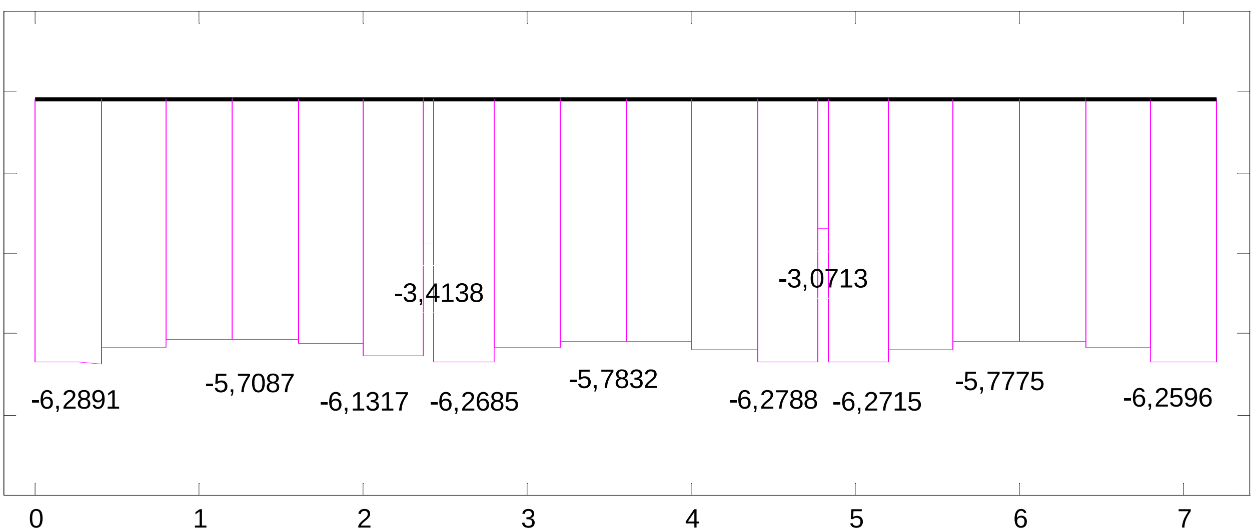
3- De resultaten zijn in figuur I.46 tot en met figuur I.50 aan het eind van het derde seizoen weergegeven:

Normaalkrachtenlijn van voorspankabels [*10^6 N], (tijd = twee jaar, Herfst)

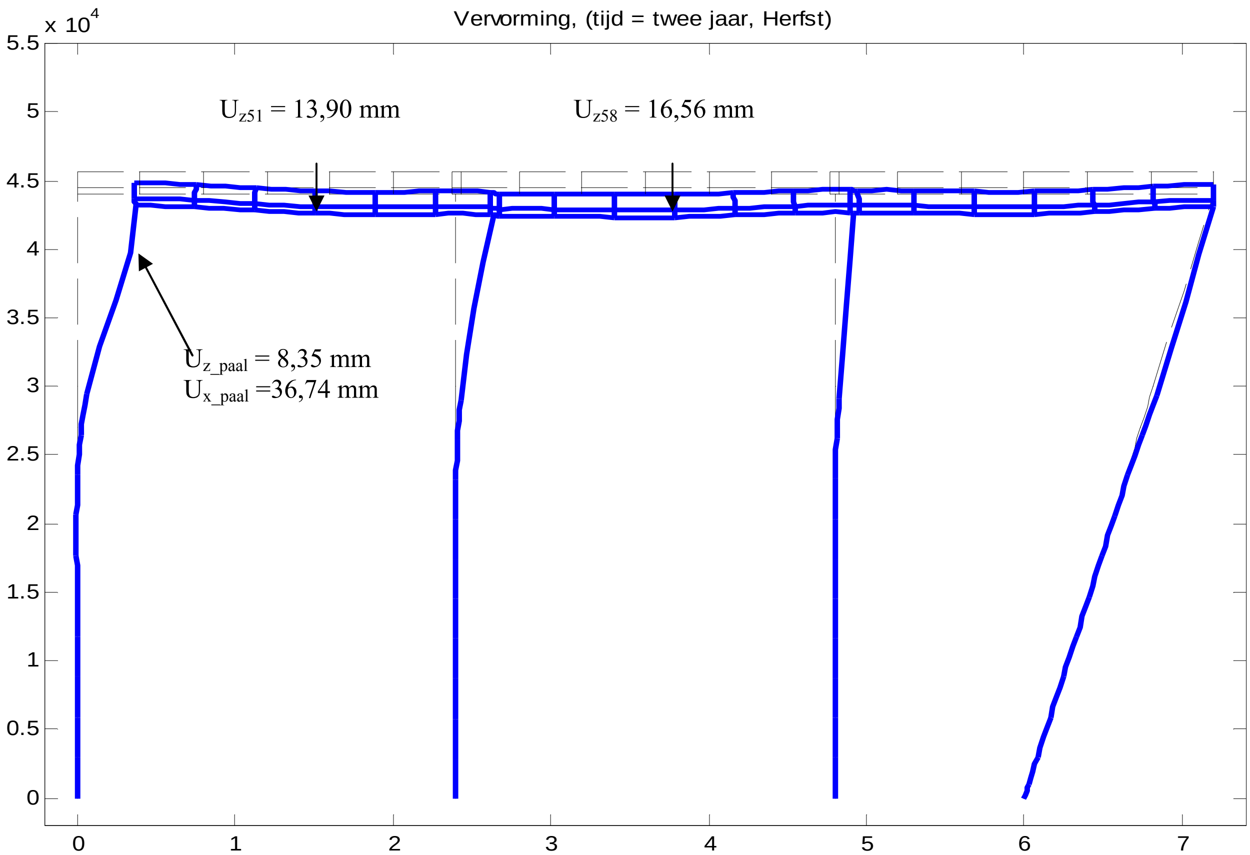


Figuur I.46: Normaalkrachtlijnen van voorspankabels na tweede jaar

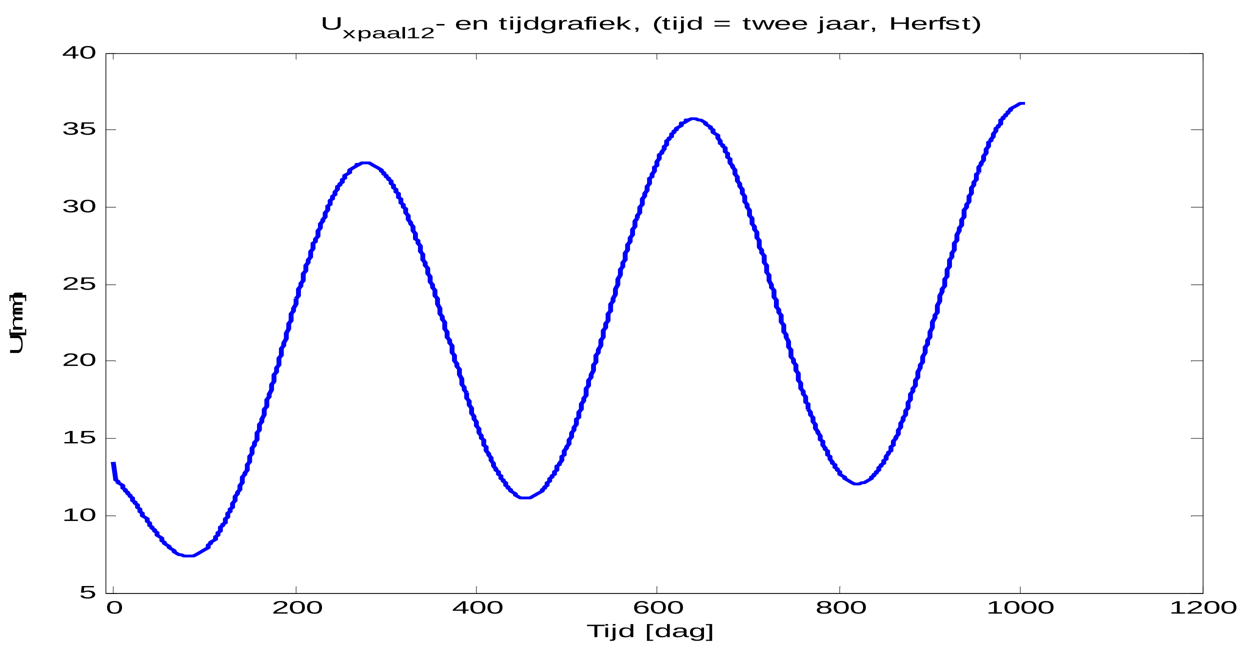
Normaalkrachtenlijn van voorspanliggers [*10^6 N], (tijd = twee jaar, Herfs)



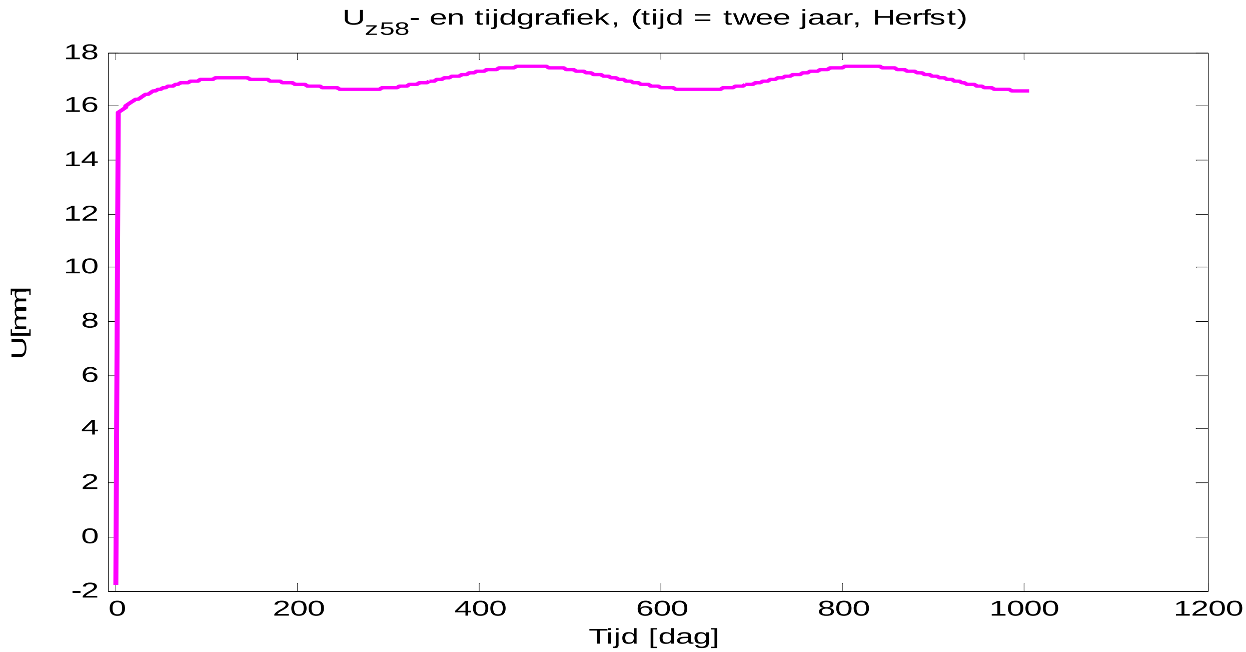
Figuur I.47: Normaalkrachtlijnen van voorspanligger na tweede jaar



Figuur I.48: Vervorming van constructie na tweede jaar

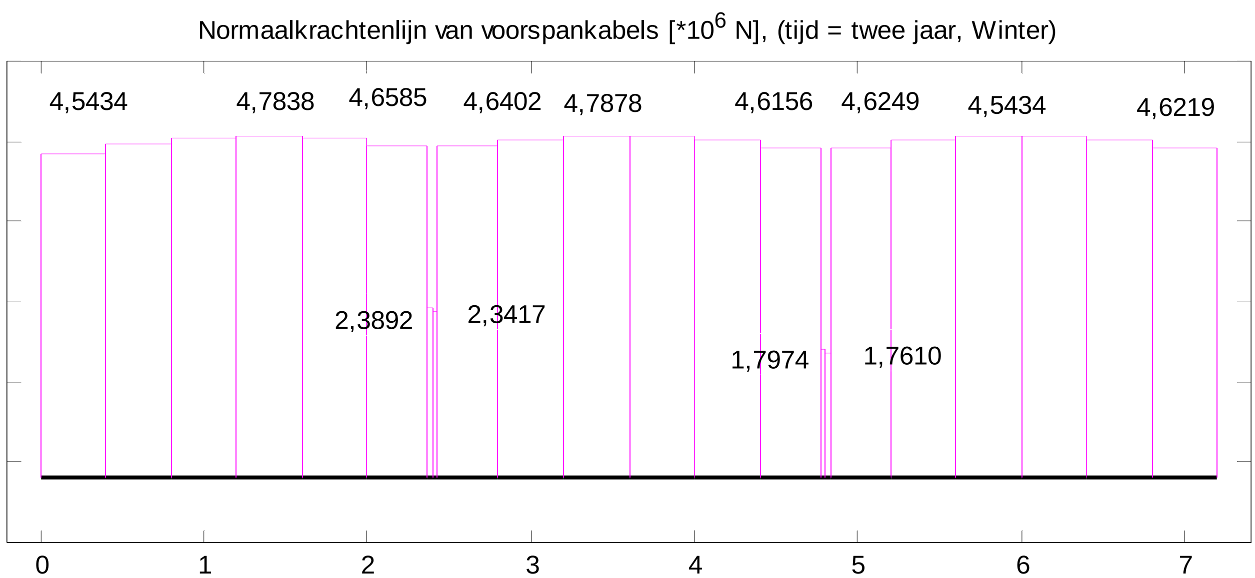


Figuur I.49: Verplaatsing (x)- en tijddiagram van het kruispunt van de linker overspanning en paal

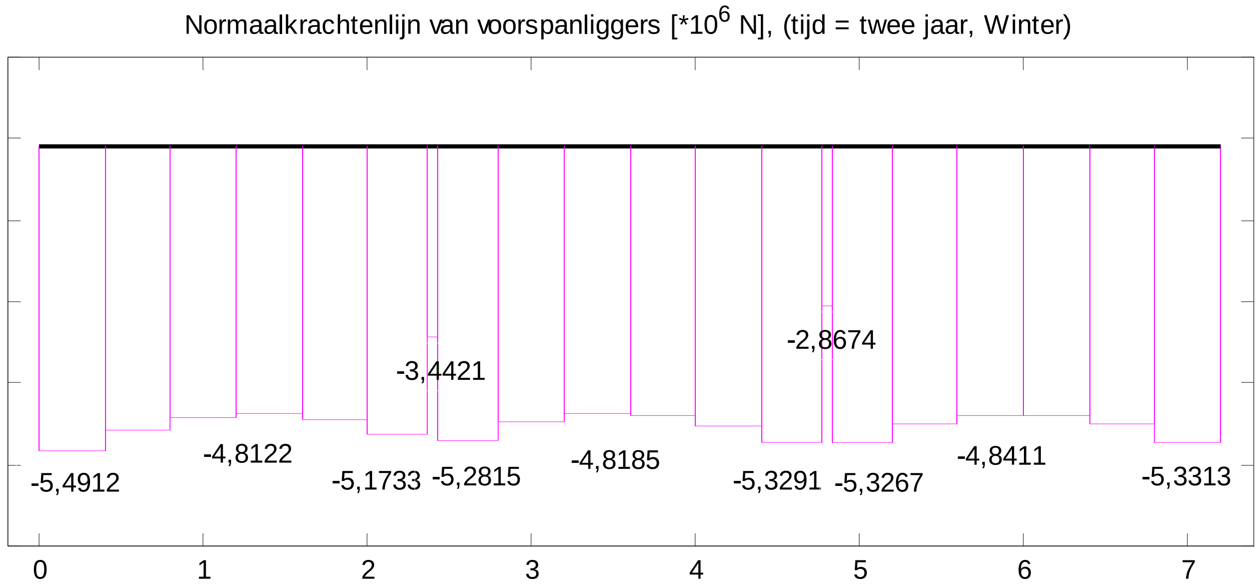


Figuur I.50: Verplaatsing (z)- en tijddiagram van het middelpuntvan de middeloverspanning

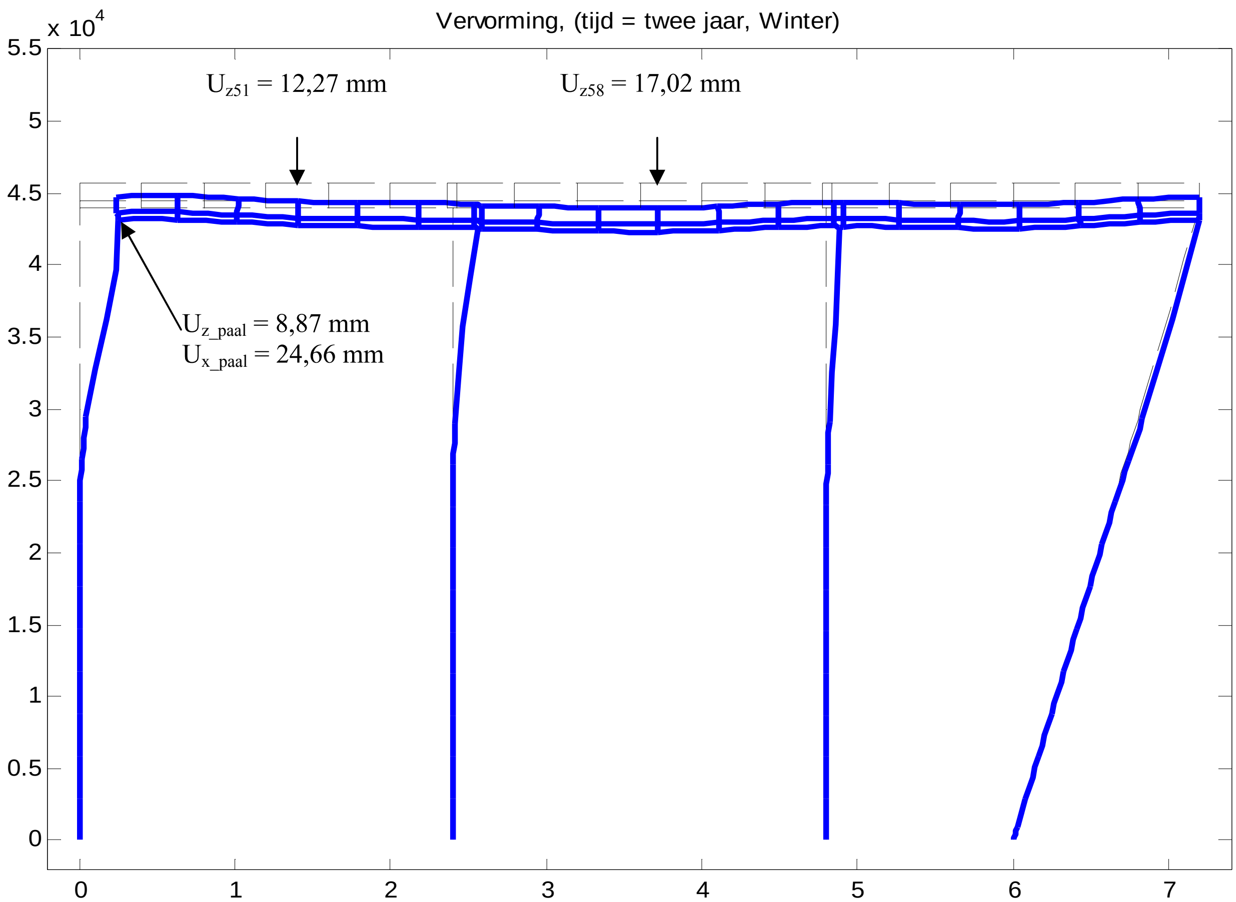
4- De resultaten zijn in figuur I.51 tot en met figuur I.55 aan het eind van het vierde seizoen weergegeven:



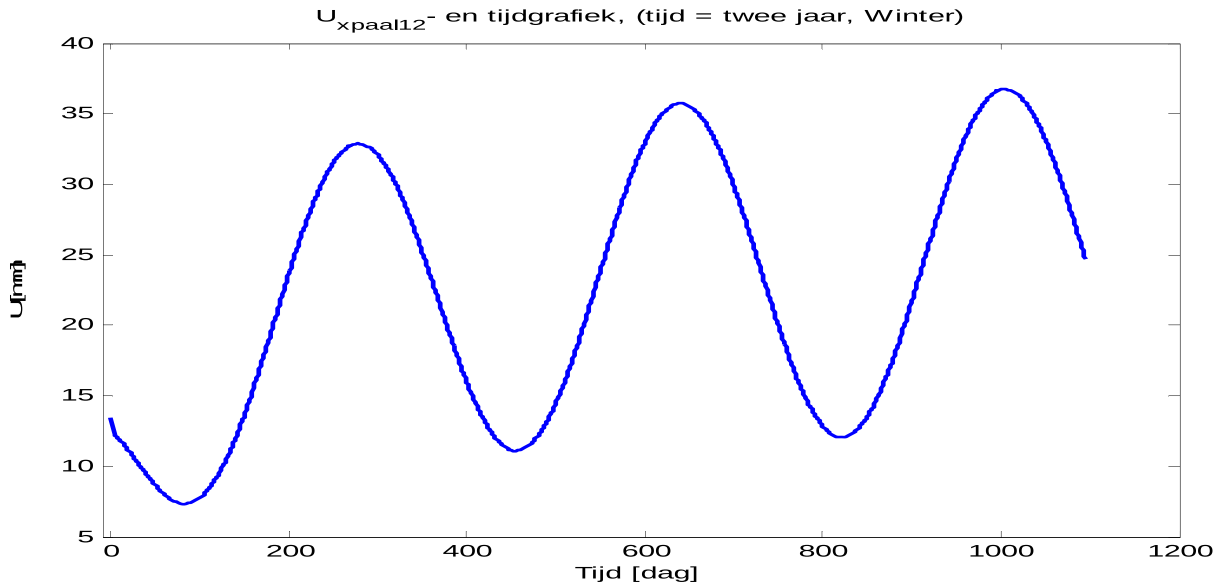
Figuur I.51: Normaalkrachtlijnen van voorspankabels na tweede jaar



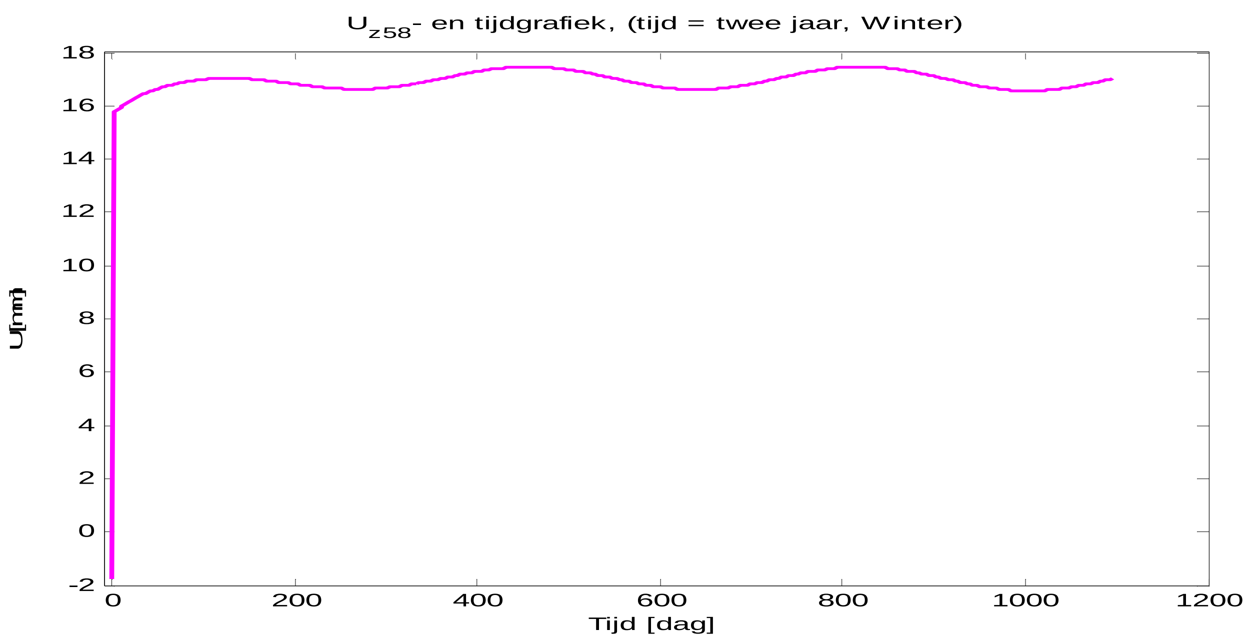
Figuur I.52: Normaalkrachtlijnen van voorspanligger na tweede jaar



Figuur I.53: Vervorming van constructie na tweede jaar



Figuur I.54: Verplaatsing (x)- en tijddiagram van het kruispunt van de linker overspanning en paal

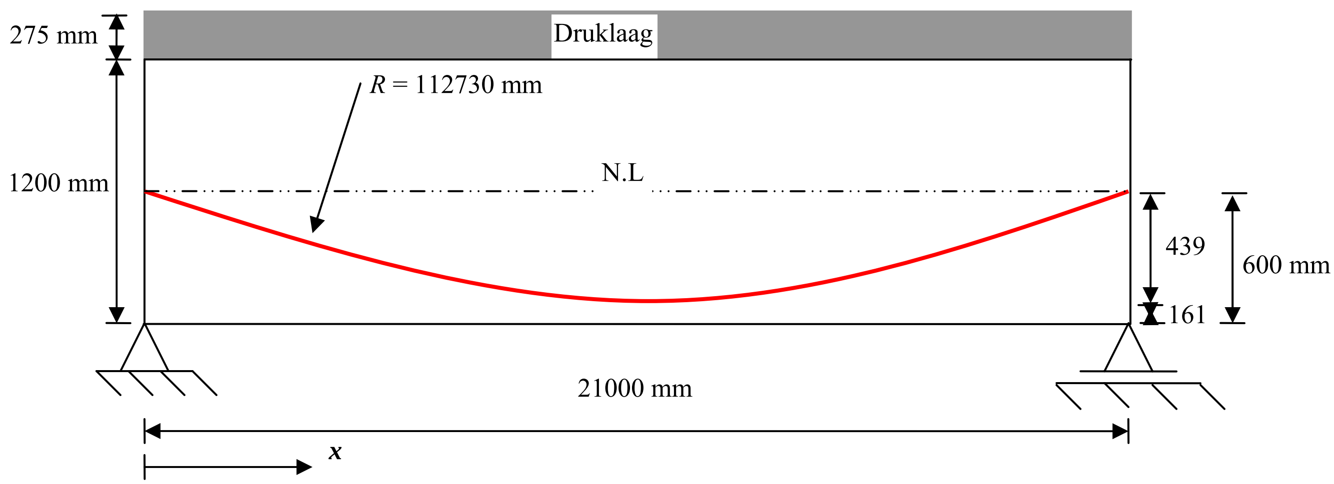


Figuur I.55: Verplaatsing (z)- en tijddiagram van het middelpunt van de middeloverspanning

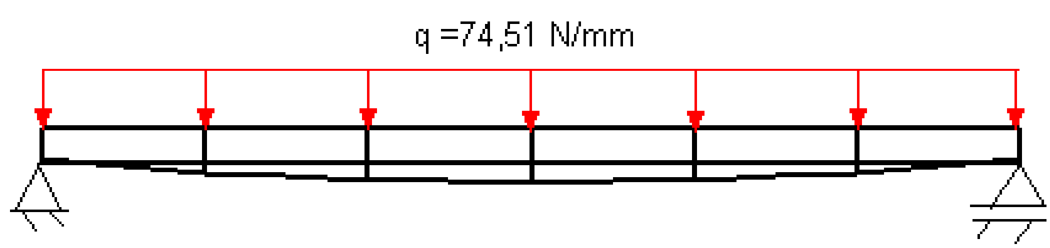
Bijlage J: Toetsen van het model

J.1 Voorspanningverlies van nagerekt gekromde voorspanligger

Hier wordt het voorspanningverlies van een nagerekte voorspanligger met een druklaag in de loop van de twintig jaar berekend, zie figuur J.1en J.2.
Alle afmetingen, eigenschappen en belastingen zijn dezelfde als hoofdstuk 10.



Figuur J.1: Constructie



Figuur J.2: Model van de constructie

De grootheden van de voorspanligger zijn als volgt:

Sterkteklasse = B45
E_b = 33500 N/mm^2
I_b= 125,75 × 10^9 mm^4
A_b = 412,5 × 10^3 mm^2
L_b = 21000 mm

Voor de druklaag is aangehouden:

Sterkteklasse = B45

E_d = 33500 N/mm^2

$$I_d = \frac{4550 \times 275^3}{12} \text{ mm}^4$$

A_d = 4550 × 275 mm^2
L_d = 21000 mm

Voor de grootheden van de verticale elementen tussen de voorspanligger en voorspanelementen zijn aangehouden:

E_{vv} = 31000 N/mm^2

$$I_{vv} = \frac{300 \times 3500^3}{12} \text{ mm}^4$$

A_{vv} = 300 × 3500 mm^2
L_{vv} = Functie van x

Voor de grootheden van de verticale elementen tussen de voorspanligger en druklaag zijn aangehouden:

E_{vd} = 31000 N/mm^2

$$I_{vd} = \frac{300 \times 3500^3}{12} \text{ mm}^4$$

A_{vd} = 300 × 3500 mm^2
L_{vd} = 737,5 mm

De grootheden van de kabels zijn als volgt:

E_d = 2,1×10^5 N/mm^2
I_d = 61686 mm^4
A_d = 2×2×11×99 mm^2
R = 112730 mm

De waarde van de initiële rek is:

$$f_p = \frac{P_0}{A_p}$$

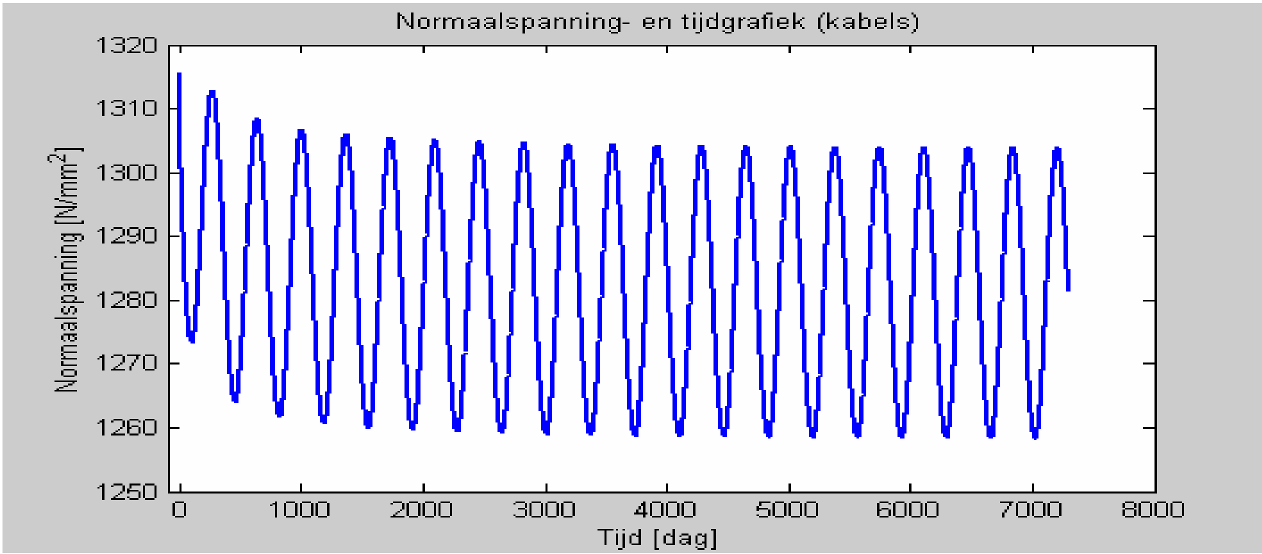
$$\varepsilon_0 = \frac{f_p}{E_{st}}$$

$$f_p = 1358\ N/mm^2$$

$$E_{st} = 2{,}1 \times 10^5$$

In figuur J.3 is het verloop van de voorspanning in de loop van twintig jaar weergegeven. Het voorspanverlies is:

$$Voorspanningverlies = \frac{1358 - 1282}{1358} \times 100 = 6\%$$

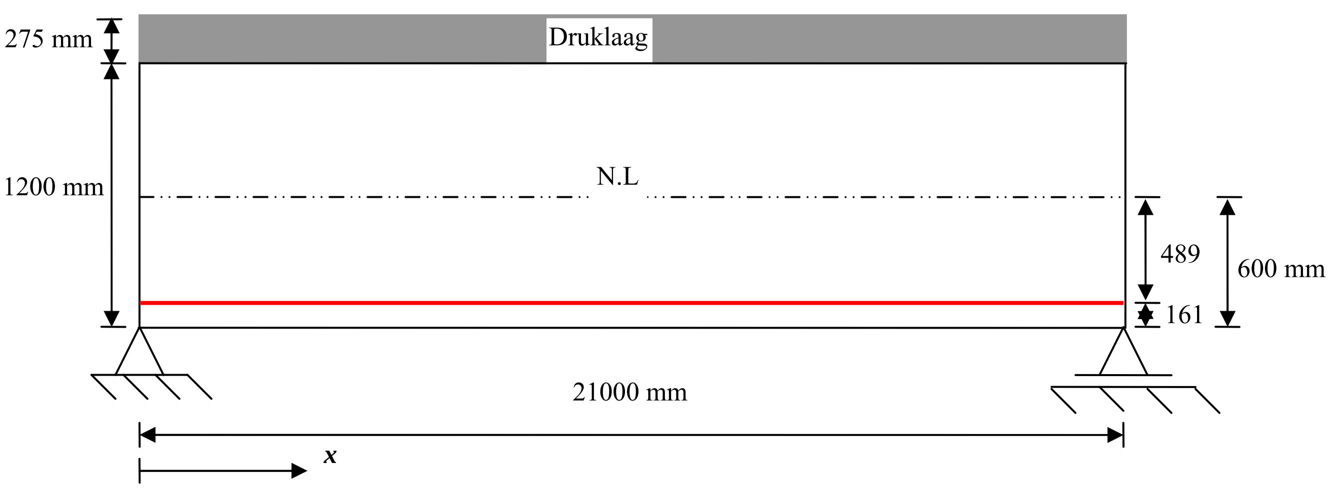


Figuur J.3: Het verloop van voorspanning

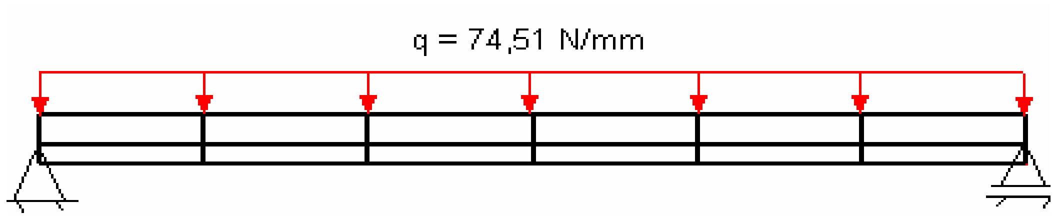
J.2 Voorspanningverlies van voorgerekte voorspanligger

Hier wordt voorspanningverlies van een voorgerekte voorspanligger met de rechte kabels berekenen. Alle gegevens zijn dezelfde als paragraaf J.1 behalve geometrie van kabels, zie figuur J.4 en J.5. De afstand tussen kabel en neutrale lijn van de ligger is de afstand tussen ligger en kabel in het midden va de ligger in paragraaf J.1, zie figuur J.1:

$$600 - 161 = 439 \ mm$$



Figuur J.4: Constructie

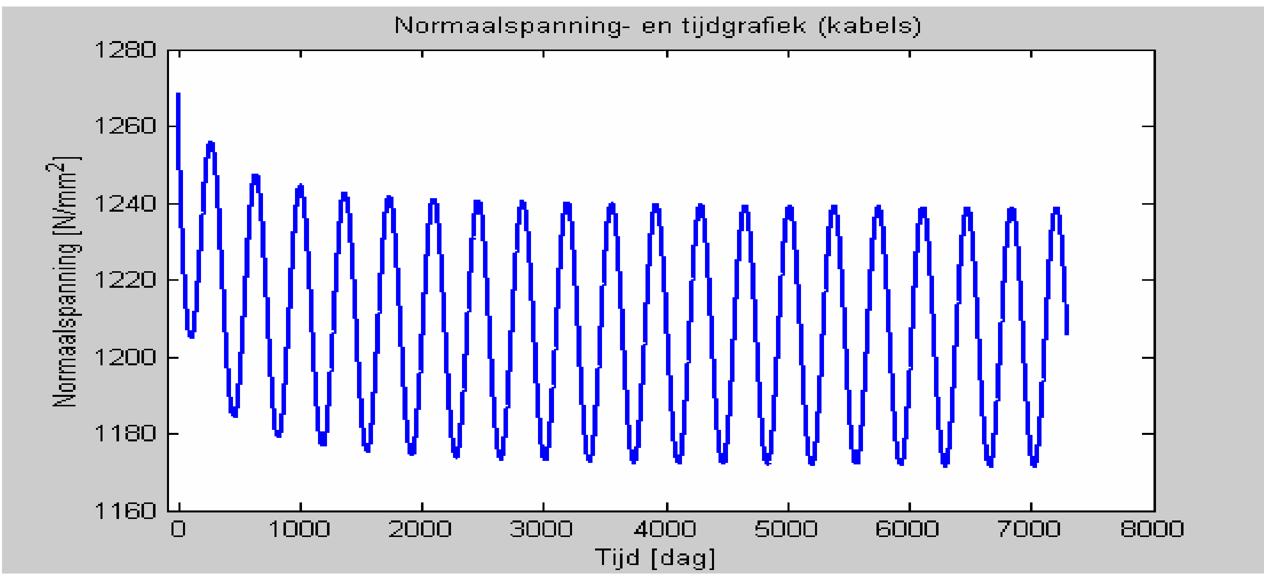


Figuur J.5: Model van de constructie

In figuur J.6 is het verloop van de voorspanning in de loop van twintig jaar weergegeven.

Het voorspanningverlies is:

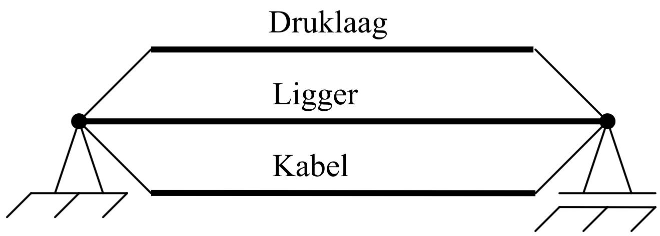
$$Voorspanningverlies = \frac{1358 - 1210}{1358} \times 100 = 11\%$$



Figuur J.6: Het verloop van voorspanning

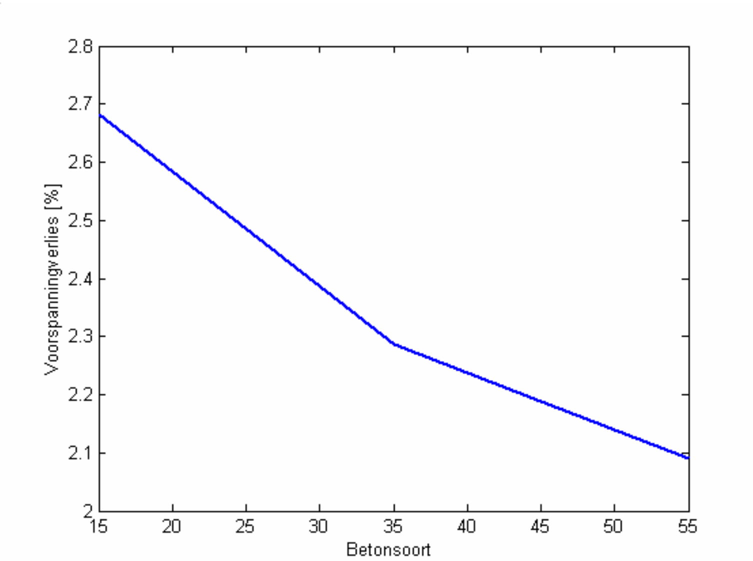
J.3 Variatie van de betonsoort van de druklaag

Hier wordt de betonsoort van de druklaag gevarieerd. Vervolgens wordt het voorspanningverlies aan het eind van de twintigste jaar bestudeerd. Met behulp van deze toetsing kan de juistheid van het antwoord van de parameterstudie bevestigd worden. In deze paragraaf wordt een eenvoudig model van een overspanning van de trestle brug gemaakt. Alle afmetingen en eigenschappen van de ligger, de druklaag en de kabels zijn dezelfde als paragraf J.1, zie ook figuur J.7. De aanvangsvoorspanning is gelijk aan 1358 N/mm^2. De karakteristieke kubusdruksterkte van de ligger blijft constant met een waarde van 45 N/mm^2.



Figuur J.6: Eenvoudig model van een overspanning van de trestle brug

Het resultaat is in figuur J.7 te zien.



Figuur J.7: Voorspanverlies als functie van de karakteristieke kubusdruksterkte

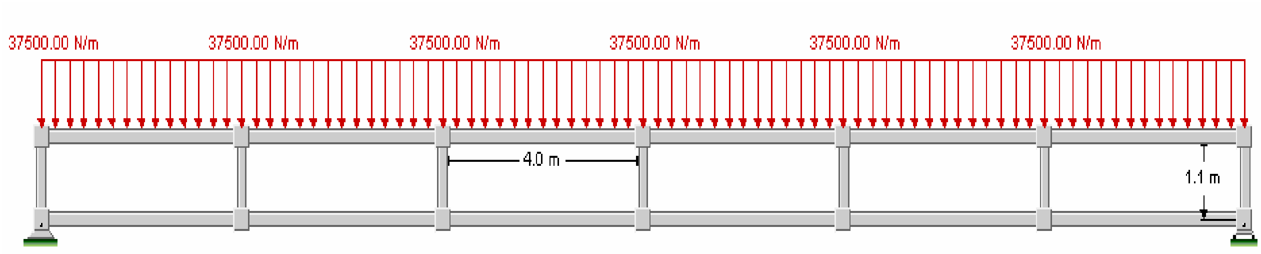
J.4 Controle van het dekmodel (Dr. Frame Programma)

In hoofdstuk 9 zijn twee modellen van de bovenbouw gemaakt. Twee modellen en de krachtwerkingen van beide modellen zijn met elkaar vergeleken. Een model is met de vakwerkanalogie gemaakt en de ander als een raamwerk. De krachtverwerking van beide gevallen zijn ongeveer dezelfde. Omdat het raamwerkmodel veel makelijker in het programma ingevoerd kan worden en minder rekentijd nodig heeft wordt er in de studie gebruik van gemaakt. Hier wordt de juistheid van het resultaat van het rekenprogramma getoetst. Hiervoor wordt normaalkrachten van het raamwerkmodel met behulp van het Dr. Frame- programma berekend, zie ook figuur J.9 en J.10.

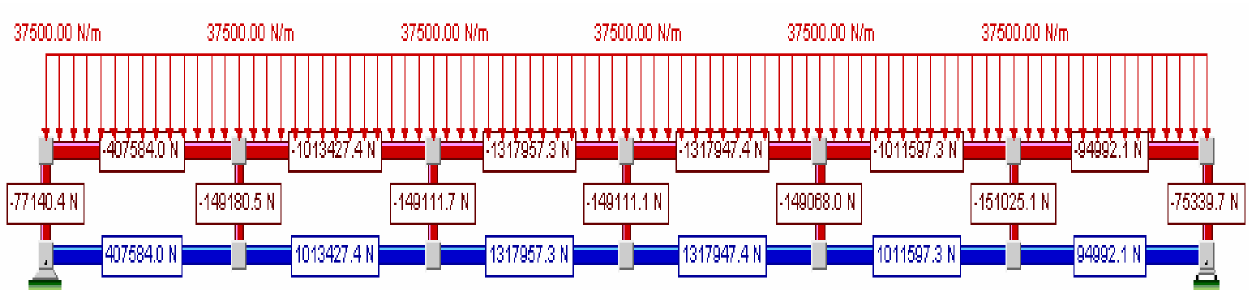
Hier is de resultaten van de beide programma's te zien.

- Het Dr. Frame Programma:
  Maximaal normaalkracht = 1318 kN

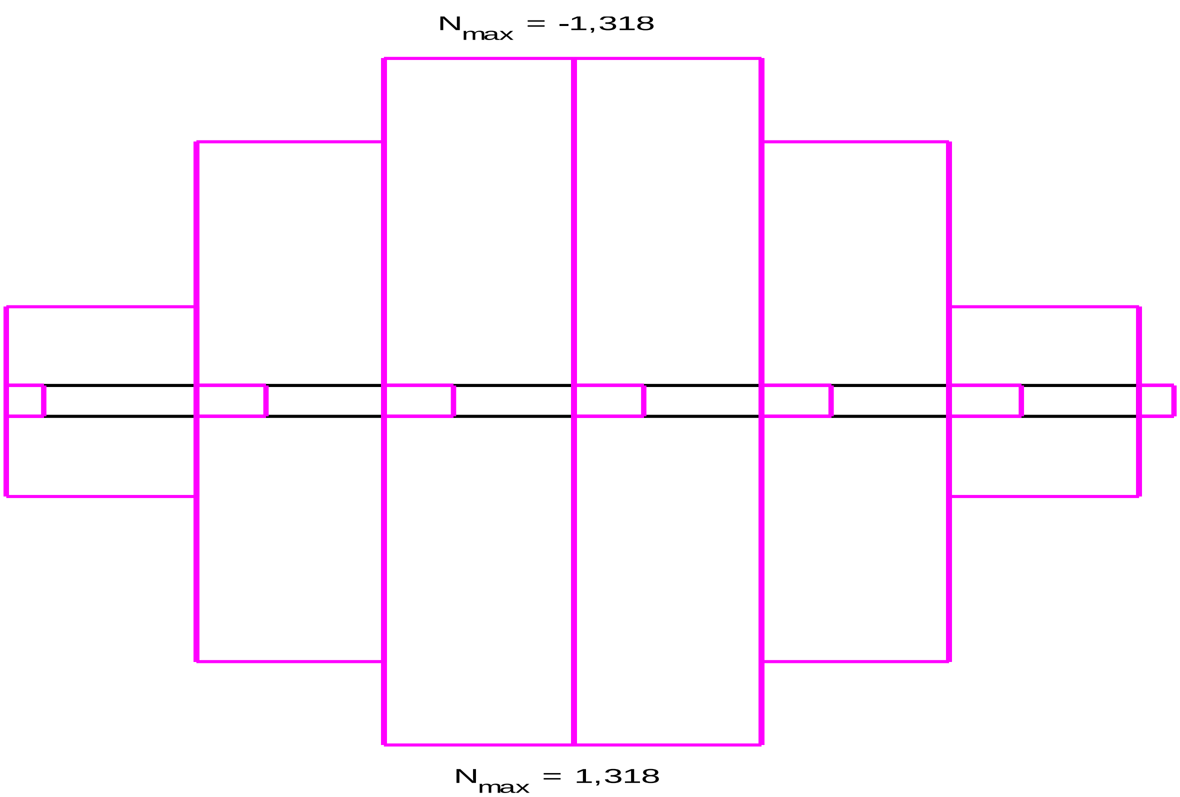
- Het rekenprogramma:
  Maximaal normaalkracht = 1318 kN



Figuur J.8: Raamwerk



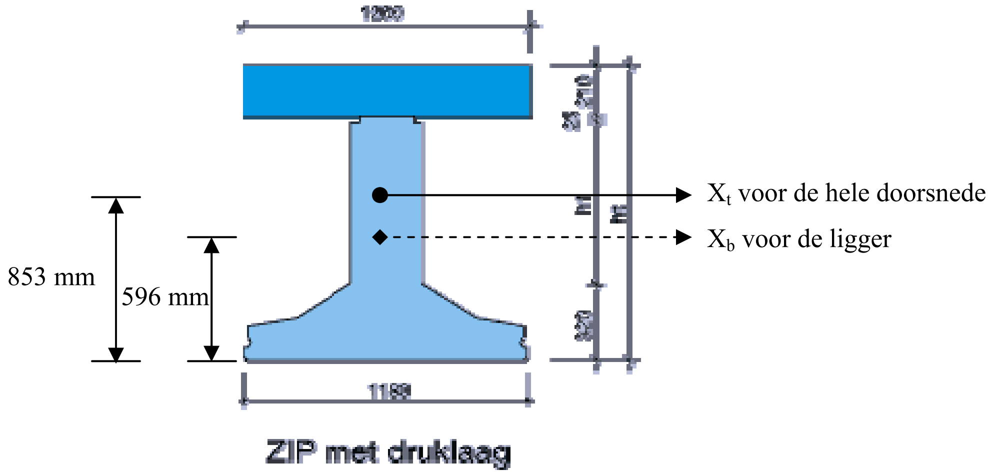
Figuur J.9: Normaalkracht, Dr. Frame- programma



Figuur J.10: Normaalkracht (×10^6 N), het rekenprogramma

J.5: Controle van het dekmodel (handmatige berekeningen)

Hier wordt de schematisatie van de bovenbouw van de brug met behulp van de handmatige berekeningen getoetst. In deze toetsing wordt de maximale normaalkracht en doorbuiging van de ligger berekend, zie figuur J.11.



Figuur J.11: Doorsnede van de ligger

- $h_t = 1825$ mm
- $h_1 = 1270$ mm
- $h_2 = 1616$ mm
- $I_b = 172{,}3 \times 10^9$ mm^4 voor de ligger
- $Z_b = 596$ mm voor de ligger
- $A_b = 661{,}45 \times 10^3$ mm^2 voor de ligger
- $I_{b+d} = I_{tot} = 368{,}6 \times 10^9$ mm^4 voor de hele doorsnede
- $Z_{b+d} = 853$ mm voor de hele doorsnede

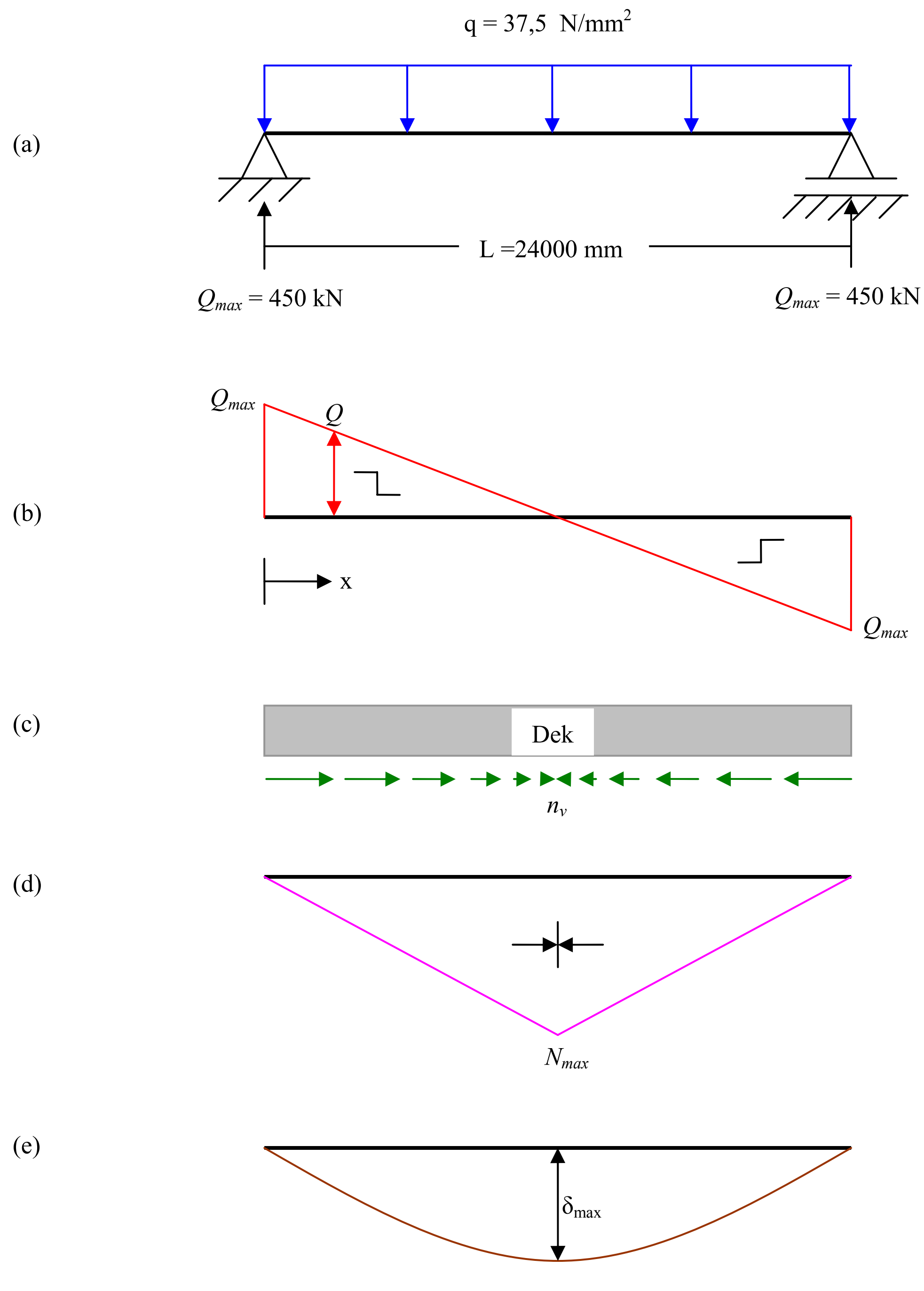
De constructie is in figuur J.12.a weergegeven. Hier dient de afschuifkracht te worden uitgerekend in de overgang van de ligger naar het dek met behulp van de formule J.1, zie ook figuur J.12.c:

$$n_v = \frac{Q \times S_b}{I_{tot}} \qquad \text{(J.1)}$$

Met deze afschuifkracht kan de normaalkracht opbouw in het dek worden berekend, zie figuur J.12.c en J.12.d.

De formule van de dwarskracht Q als functie van x wordt aangehouden, zie ook figuur J.2.b:

$$Q = \frac{Q_{\max}(l - 2x)}{l}$$



Figuur J.12: Ligger (a), dwarskrachtlijn (b), Schuifspanningverwerking tussen ligger en druklaag (c), normaalkracht (d), doorbuiging (e)

Uit substitutie van J.1 met J.2 geldt:

$$n_v = \frac{Q_{\max} \times S_b \times (l - 2x)}{I_{tot} \times l} \tag{J.2}$$

Voor de normaalkracht in de constructie geldt:

$$N = \int_0^x n_v .dx = \int_0^x \frac{Q_{\max} \times S_b \times (l-2x)}{I_{tot} \times l} .dx$$

$$N_{\max} = \int_0^{l/2} \frac{Q_{\max} \times S_b \times (l-2x)}{I_{tot} \times l} .dx$$

$$N_{\max} = \frac{Q_{\max} \times S_b \times l}{4 \times I_{tot}}$$

$$S_b = A_b \times (Z_{b+d} - Z_b) = 170 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

$$I_{tot} = 368,6 \times 10^9 \text{mm}^4$$

$$l = 24 \times 10^3 \text{ mm}$$

$$Q_{\max} = 450 \times 10^3 \text{ N}$$

$$N_{\max} = 1370 \times 10^3 \text{ N}$$

Voor de maximale doorbuiging wordt aangehouden:

$$\delta_{\max} = \frac{5 \times q \times l^4}{384 \times EI}$$

$$q = 37,5 \text{ N/mm}$$

$$E = 31000 \text{ N/mm}^2$$

$$I = I_{tot} = 368,6 \times 10^9 \text{mm}^4$$

$$l = 24 \times 10^3 \text{mm}$$

$$\delta_{\max} = 14 \text{ mm}$$

	δ_{max} (mm)	N_{max} (kN)
Handmatige berekening	14	1370
Raamwerkmodel	13,3	1320
Vakwerkanalogie	12,5	1330

Tabel J.1

In tabel J.1 zijn de resultaten van de handmatige berekeningen, het raamwerkmodel en de vakwerkanalogie te zien.