

VOORWOORD

Kunstmatige grondbevriezing staat sinds de toepassing voor de aanleg van de dwarsverbindingen van de Westerscheldetunnel sterk in de belangstelling. De techniek is een tijdelijke en milieuvriendelijke manier van grondverbetering en wordt in het buitenland al meer dan 40 jaar toegepast. De aanleg van de dwarsverbindingen van de Westerscheldetunnel bood een unieke kans om de ontwikkeling van de temperatuur en de deformatie van de grond en tunnel – die zich voordoen bij grondbevriezing – alsmede het werkproces te volgen en te bepalen. Deze rapportage is daar het resultaat van.

In het rapport is veel informatie opgenomen over het ontwerp en de uitvoering van projecten met grondbevriezing. In de evaluatie is hiernaast veel aandacht besteed aan de relatie tussen de processen van de grond en de deformatie van tunnelconstructies.

De oorzaken van de risico's van grondbevriezing komen aan het licht wanneer de civiele techniek, geotechniek en geologische eigenschappen gezamenlijk bestudeerd worden. De procedure van grondbevriezing, de eigenschappen van de grond en de gewenste constructie zijn dan de belangrijkste ingrediënten. De resultaten benadrukken dat de techniek van grondbevriezing een goede manier is om ondergrondse constructies aan te leggen, maar dat adequate monitoring vereist is.

De auteurs zijn ervan overtuigd dat het F100 praktijkproject voldoende praktische kennis heeft opgeleverd om in de toekomst grondbevriezing doeltreffender te kunnen toepassen in andere tunnelprojecten in Nederland.

Het F100-onderzoek is gefinancierd door het Gemeenschappelijk Platform Praktijkonderzoek Boortunnels. Het GPB bestaat uit projectorganisaties van de Betuweroute, de HSL, de Noord/Zuidlijn en COB (Delft Cluster, RWS en projectparticipanten).

SAMENSTELLING UITVOERINGSKOMMISSIE F100:

Ir. Evert Worm	Rijkswaterstaat/Bouwdienst Rijkswaterstaat – <i>voorzitter</i>
Ir. Bas Hemmen	Delft Cluster/GeoDelft – <i>secretaris</i>
Ir. Harry Dekker	COB - <i>coördinator</i>
Ir. Marius Naaktgeboren	Rijkswaterstaat/Bouwdienst/HSL-Zuid
Drs. Richard Rijkers	Delft Cluster/TNO-NITG
Ir. Peter Roelands	Railinfrabeheer/ManagementGroep Betuweroute
Ir. Ron van Beek	Rijkswaterstaat/Noordzuidijn/W+B
Ir. Hein Jansen	TEC/Fugro
Ir. Paul Litjens	COB - <i>coördinator</i>
Ing. Johan de Boer	TBI Holding
Stefan Danieli	Tubecon
Jan van der Graaf	ITM
Ir. J. Jansen	Arcadis
Peter Langhorst	HBG Civiel Grondtechniek
Ir. Dirk Luger	Delft Cluster/GeoDelft
Ing. Ab Proper	Tubecon
Ing. R. Rozing	Holland Railconsult
Rob Schippers	BTC

Voorliggend rapport geeft een schat aan informatie over de toegepaste vriestechniek bij het realiseren van de dwarsverbindingen van de Westerscheldetunnel. Met dank aan de aannemerscombinatie KMW, die haar meetgegevens beschikbaar stelde en de opdrachtnemers TNO en GeoDelft, die het leeuwendeel van het uitvoerende werk verrichtten.

In het bijzonder dank aan de heren Roelands en Naaktgeboren van de uitvoeringscommissie voor hun uiterst waardevolle inbreng, die de kwaliteit van deze rapportage ten goede is gekomen.

E.W. Worm (voorzitter)

PROJECTDEFINITIE

Bij de bouw van de Westerscheldetunnel zijn ten behoeve van de aanleg van 26 dwarsverbindingen grondbevriezingstechnieken gebruikt. Bij de eerste en tweede dwarsverbinding worden speciale metingen verricht in het kader van het COB-praktijkonderzoek F100. De metingen worden zowel in de grond als in de tunnelconstructie uitgevoerd om de (geo-)mechanische en thermische effecten van de grondbevriezing zo goed mogelijk te kunnen bestuderen. De dwarsverbindingen zijn aangelegd gedurende het voorjaar en de zomer van 2000.

DWARSVERBINDINGEN VAN DE WESTERSCHELDETUNNEL

De Westerscheldetunnel bestaat uit twee tunnelbuizen van ongeveer 6,6 km lengte. De hoofdtunnels hebben een diameter van 11,30 m. De grondbevriezing wordt uitgevoerd met 22 vrieslansen waar een vriesvloeistof (calciumchloride) doorheen wordt gepompt met een temperatuur van ca. -36 tot -38 °C. De vorming van de bevroren grond kan gecontroleerd worden met twee diagonaal geïnstalleerde temperatuurlansen en met 26 temperatuursensoren op de hoofdtunnelbuizen. Wanneer de grond bevroren is kan ontgraving, bouw en afwerking van de binnenwand van de dwarsverbinding onder atmosferische druk worden uitgevoerd.

KUNSTMATIGE GRONDBEVRIEZING (AGF)

De toepassing van kunstmatige grondbevriezing (Artificial Ground Freezing) is een controleerbare techniek gebleken om dwarsverbindingen van de Westerscheldetunnel te bouwen. Een langere vriestijd en het gebruik van extra isolatie is bij de eerste twee verbindingen effectief geweest om het gewenste resultaat (waterdichtheid) te bereiken.

RISICO'S

De geïdentificeerde bouwrisico's bij het gebruik van kunstmatige grondbevriezing zijn:

1. tunneldeformatie, tunnelsegmentverplaatsing, voegverplaatsingen en scheuren;
2. waterdichtheid van het bevroren grondlichaam;
3. instabiliteit van de bevroren grond;
4. maaiveldzetting;
5. waterdichtheid van de dwarsverbinding na ontdooiing.

De oorzaken hiervoor liggen in de uitzetting van bevroren grond (ijslensvorming en verhoging waterdruk), ongecontroleerde hoge temperaturen, zout water, onvoldoende isolatie en onvoldoende spuitbeton.

GEOLOGISCHE OPBOUW EN GRONDSPANNINGEN

Het verschil in sterkteontwikkeling en vriesspanningen van de grond bij dwarsverbinding-1 (DV1) en dwarsverbinding-2 (DV2) is groot. De verschillen worden grotendeels verklaard door de verschillende grondsoorten die bevroren worden: resp. zand en klei. Daarom wordt aanbevolen naast geotechnisch onderzoek ook geologisch onderzoek te doen naar de specifieke grondsoorten, de ruimtelijke verdeling, alsmede de drainerende eigenschappen.

De vriesspanningen en de deformatie van de grond naast en boven het bevroren grondmassief bij DV2 zijn significant hoger dan in het bevroren zand bij DV1. Extra grondspanningen als gevolg van bevriezing kunnen oplopen tot ca. 50 kPa bij DV1 (in zand) tot ca. 800 kPa bij DV2 (in klei).

LABORATORIUMONDERZOEK CRYOGENE EIGENSCHAPPEN

Ten behoeve van een stabiel ontwerp met toepassing van AGF wordt aanbevolen laboratoriumtesten uit te voeren met de specifieke grondsoorten die in het werk bevroren worden: sterkte/stijfheid, 3D-vorstuitzetting en eventueel kruip. Niet van alle grondsoorten die voorkomen in Nederland is betrouwbare kwantitatieve informatie beschikbaar. Met name van gemengde grondsoorten die voorkomen in Nederland, zoals kleihoudend zand, zandige klei, silt/leem en humushoudende klei is weinig bekend.

DEFORMATIE VAN DE TUNNEL

De deformatie van de hoofdtunnelbuizen wordt voornamelijk veroorzaakt door de uitzetting van de bevriezende grond en de opsluiting van water. Om vervormingen van de aangrenzende grond bij de ondergrondse constructies te verminderen is het aan te raden het temperatuurveld zodanig te kiezen dat er nauwelijks temperatuurgradiënten loodrecht op constructies ontstaan. Het wordt daarnaast aanbevolen in goed-doorlatende grondsoorten een drainagevoorziening (of drukventiel) aan te leggen in het hart van de te realiseren dwarsverbinding. Helaas zijn voor slecht doorlatende gronden geen maatregelen bekend om dit effect tegen te gaan en zal rekening gehouden moeten worden met relatief grote krachten.

ISOLATIE

Ten behoeve van een goede waterdichte aansluiting van het ijslichaam op de ondergrondse constructies is het noodzakelijk (actieve) isolatie te plaatsen om storende toestroming van warmte naar de beoogde bevroren grond te vermijden. De isolatie wordt dan aangebracht op de tunnelwand of op de constructies die naar verwachting warmte geleiden.

MONITORING

Een correcte temperatuurprognose is belangrijk voor de uitvoering. Zowel temperatuurontwikkeling van de grond als van de tunnelsegmenten is van groot belang. Het wordt sterk aanbevolen de deformatie en verplaatsing van de aanpalende (ondergrondse) constructies te monitoren. Tevens is monitoring van de temperatuur van de grond en de aangrenzende constructies essentieel om het vriesproces te kunnen beheersen. De waterdichtheid van een bevroren grondmassief is zeer belangrijk voor de veiligheid in de tunnel. Door gegevens van de temperatuurmonitoring van grond en tunnelsegmenten te combineren is het mogelijk de waterdichtheid van het cilindrische bevroren grondlichaam te garanderen. Het risico van lekkages is groot direct langs de relatief warme hoofdtunnelbuizen en in aquifers met zout water.

REDUCTIE VRIESDRUK EN DRAINAGE

Het wordt sterk aanbevolen het onbevroren hart vroegtijdig te draineren om de tunneldeformatie te minimaliseren. Het draineren van het onbevroren hart van kleigrond heeft slechts een beperkt effect op het verminderen van de deformatie van de tunnel. Dit komt doordat de vriesspanning van het cilindrisch bevroren grondmassief ook bij openen van het veiligheidsventiel op de tunnelwanden behouden blijft (of zelfs lokaal wordt vergroot).

ZOUT WATER

Het zoutgehalte van de aquifer Z1 bij DV1 heeft geleid tot lokale verhoging van de zoutconcentratie, waarschijnlijk als gevolg van de grondbevriezing. Dit gebeurt door segregatie van zoutmineralen die in oplossing blijven en de grond. Het is niet met zekerheid vast te stellen of dit heeft geleid tot problemen met de waterdichtheid van het bevroren grondmassief bij DV1.

AANBEVELINGEN

In het hoofdstuk Aanbevelingen worden de resultaten van dit project gepresenteerd als een leidraad met praktische aanbevelingen. De aanbevelingen die gedaan worden betreffen de volgende onderwerpen:

1. lokaal geologisch en geohydrologisch onderzoek;
2. laboratoriumonderzoek van geomechanische eigenschappen van bevroren grond;
3. controle van temperatuur en waterdichtheid van een bevroren grondlichaam;
4. controle van vriesspanningen;
5. uitvoeringsproblemen, maatregelen en verhoging van toleranties.

CONCLUSIES

Ongecontroleerde toepassing van AGF in de tunnelbouw kan leiden tot significante schade aan ondergrondse constructies. Bij voldoende kennis van de eigenschappen van de grond en een deskundige toepassing van AGF kan het vriesproces voldoende beheerst worden.

Het F100-praktijkproject heeft geleid tot veel noodzakelijke en praktische kennis om de uitvoeringsrisico's van AGF bij gebruik in de tunnelbouw te minimaliseren. Door middel van dit praktijkonderzoek is deze kennis praktisch toepasbaar geworden voor de Nederlandse tunnelbouw.

INHOUDSOPGAVE

Inhoudsopgave	I
Voorwoord	II
Samenstelling uitvoeringscommissie F100	III
Samenvatting	I
Lijst van figuren	XIV
Lijst van tabellen	XVII
Grootheden en symbolen	XX
1 HET PROJECT F100	1
1.1 GRONDBEVRIEZING VOOR DE AANLEG VAN DWARSVERBINDINGEN	1
1.2 DOELSTELLINGEN VAN DE ANALYSE	1
1.3 GEPLANDE PROJECTACTIVITEITEN	2
1.4 RAPPORTAGE	3
2 KUNSTMATIGE GRONDBEVRIEZING	4
2.1 GRONDBEVRIEZING IN DE PRAKTIJK	4
2.2 DWARSVERBINDINGEN VAN DE WESTERSCHELDETUNNEL	4
2.3 RISICO'S BIJ DE AANLEG VAN DWARSVERBINDINGEN MET AGF	6
2.4 HET ONTWERP EN DE UITVOERING AGF	6
2.4.1 Het thermische en constructieve ontwerp van een vrieslichaam	7
2.4.2 Uitvoering van de bevroeringsactiviteiten	8
2.5 MONITORING EN CONTROLE VAN DE VRIESOPERATIE	9
2.6 HET GEOMECHANISCH GEDRAG VAN BEVROREN GROND	9
2.7 CRYOSUCTIE EN IJSLENSVORMING	11
2.8 VORSTHEFFING, VORSTGEVOELIGHEID EN VRIESSPANNINGEN	11
2.9 STERKTE EN KRUIP VAN BEVROREN GROND	14
2.9.1 Uni-axiale druksterkte en triaxiale sterkte	15
2.9.2 Kruip	15
2.10 DE ONBEVROREN WATERFRACTIE IN BEVROREN GROND	16
2.11 AANBEVELINGEN VOOR LABORATORIUMEXPERIMENTEN	17
2.12 PRAKTIJKPROBLEMEN MET GRONDBEVRIEZING	18
2.12.1 Grondwater	20
2.12.2 Gronddeformatie	21
2.12.3 Uitvoering	21
2.13 ERVARINGEN MET GRONDBEVRIEZING	22
3 GEOMECHANISCHE EIGENSCHAPPEN VAN DE GROND	24
3.1 INLEIDING	24
3.2 GRONDLAGEN BIJ DE DWARSVERBINDINGEN DV1 EN DV2	24
3.3 GEOLOGISCHE EN GEOTECHNISCHE EENHEDEN	26
3.3.1 Formatie van Tongeren (Oligoceen)	26
3.3.2 Formatie van Rupel (Oligoceen)	26
3.3.3 Formatie van Naaldwijk (Holoceen)	27
3.4 GEOMECHANISCHE LAAGEIGENSCHAPPEN	28
3.4.1 Korrelgrootte	28
3.4.2 Watergehalte, dichtheid en porositeit	30
3.5 DOORLATENDHEID	32

3.6	ATTERBERGSE GRENZEN	33
3.7	ONGEDRAINEERDE SCHUIFSTERKTE	34
3.8	GRONDWATER EN ZOUTGEHALTE	34
3.8.1	Zoutgehalte van grondlagen bij de zuidelijke toerit	34
3.8.2	Grondwaterstromingen	36
3.9	GRONDSPANNINGEN EN WATERSPANNING	36
3.10	VORSTGEVOELIGHEID	38
3.11	ZANDLAGEN EN ZOUTGEHALTE ONDER DE WESTERSCHELDE	38
3.11.1	Zandlagen in het profiel van de Westerscheldetunnel	39
3.11.2	Zoutgehalte van grondlagen onder de Westerschelde	39
3.12	SAMENVATTING	40
4	LABORATORIUMONDERZOEK BEVROREN GROND T.B.V. DE DWARSVERBINDINGEN WESTERSCHELDETUNNEL	42
4.1	GEOTECHNISCHE ONTWERPPARAMETERS BEVROREN GROND (KMW)	42
4.1.1	Uni-axiale druksterkte (T = -5, -10 en -20 °C)	43
4.1.2	Eén-axiaal kruipgedrag (T = -10 °C)	43
4.1.3	Triaxiale sterkte (T = - 10 °C en -20 °C)	44
4.1.4	1D-vorstheffing	45
4.2	LABORATORIUMONDERZOEK 3D-VORSTHEFFING	46
4.3	SAMENVATTING	47
5	THERMISCHE EIGENSCHAPPEN VAN BEVROREN GROND	50
5.1	WARMTECAPACITEIT VAN GROND	50
5.2	THERMISCHE EIGENSCHAPPEN BEVROREN GROND	50
5.2.1	Bepaling van de warmtecapaciteit	51
5.2.2	Bepaling van de conductiviteit	51
5.3	ZOUTCONCENTRATIE	54
5.4	CONVECTIE	54
5.5	SAMENVATTING	54
6	MEETPROGRAMMA F100	55
6.1	METINGEN A: KMW	55
6.2	METINGEN B: F100	56
6.2.1	Meetapparatuur in de grond	56
6.2.2	Methode plaatsing en afwerking boorgaten	56
6.3	TRAJECTEN IN HET VRIES- EN DOOIPROCES	57
6.4	METINGEN B: MEETPROGRAMMA BIJ DWARSVERBINDING DV1	58
6.5	MEETFREQUENTIE METINGEN B BIJ DV1	60
6.6	METINGEN B: MEETPROGRAMMA BIJ DWARSVERBINDING DV2	60
6.7	MEETFREQUENTIE METINGEN B BIJ DV1	63
6.8	GRONDSPANNINGEN	65
6.9	WATERSPANNINGEN	66
6.10	GRONDDEFORMATIES	67
6.11	TEMPERATUREN	67
6.12	VERWERKING VAN DE METINGEN	68
6.13	OVERZICHT OPNEMERS	68
6.14	BEGINSITUATIES EN NULMETINGEN	68
6.14.1	Nulmetingen DV1	69
6.14.2	Nulmetingen DV2	70
6.15	BEPROEVING KERNEN SPUITBETON	71

6.16	WERKING EN EVALUATIE MEETAPPARATUUR	73
6.17	SAMENVATTING	74
7	EVALUATIE DV1	75
7.1	TRAJECTEN IN HET VRIES- EN DOOIPROCES	75
7.2	TEMPERATUURVERLOOP	76
7.2.1	Algemeen	76
7.2.2	Externe invloeden	77
7.2.3	Bijzonderheden	79
7.3	SPANNINGSVERLOOP	79
7.3.1	Stijfheid van de grond	79
7.3.2	Vergelijking van spanningsopnemers onderling	79
7.3.3	Waterspanningen	80
7.3.4	Algemeen grondspanningen	80
7.3.5	Waterspanningen	92
7.4	DEFORMATIE VAN DE GROND	93
7.4.1	Extensometers	94
7.4.2	Hellingmeetbuizen	95
7.4.3	Bijzonderheden	96
7.5	TEMPERATUURONTWIKKELING VAN DE HOOFDTUNNELBUIZEN	96
7.5.1	Temperatuurontwikkeling van de oostbuis bij DV1	96
7.5.2	Temperatuurontwikkeling van de westbuis bij DV1	97
7.6	DEFORMATIE VAN DE HOOFDTUNNELBUIZEN BIJ DV1	98
7.6.1	Verplaatsingen van de westbuis bij DV1	98
7.6.2	Steekmetingen van de west- en oostbuis bij DV1	103
7.7	OPENEN VEILIGHEIDSDEUR EN CONTROLE SLUITING VAN HET IJSLICHAAM	104
7.8	RELATIE WATERDRUK EN TUNNELDEFORMATIE	107
7.9	SAMENVATTING OBSERVATIES DV1	108
8	EVALUATIE DV2	110
8.1	TRAJECTEN IN HET VRIES- EN DOOIPROCES	110
8.2	TEMPERATUURVERLOOP	110
8.2.1	Algemeen	111
8.2.2	Externe invloeden	111
8.3	SPANNINGSVERLOOP	112
8.3.1	Stijfheid van de grond	112
8.3.2	Vergelijking van spanningsopnemers onderling	113
8.3.3	Grondspanningen en waterspanningen	114
8.3.4	Algemeen grondspanningen	117
8.4	DEFORMATIEVERLOOP	124
8.4.1	Extensometers	126
8.4.2	Hellingmeetbuizen	127
8.5	TEMPERATUURONTWIKKELING VAN DE HOOFDTUNNELS BIJ DV2	127
8.5.1	Temperatuurontwikkeling van de oostbuis bij DV2	127
8.5.2	Temperatuurontwikkeling van de westbuis bij DV2	128
8.6	DEFORMATIE VAN DE HOOFDTUNNELBUIZEN BIJ DV2	128
8.6.1	Verplaatsingen van de hoofdtunnelbuisen bij DV2	129
8.6.2	Steekmetingen van de west- en oostbuis bij DV2	132
8.7	RELATIE WATERDRUK EN TUNNELDEFORMATIE DV2	133
8.8	SAMENVATTING OBSERVATIES DV2	134

9	VERGELIJKING F100-VELDMETINGEN MET 3D-VORSTHEFFINGSPROEVEN	137
9.1	VERGELIJKING ZAND EN KLEI	137
9.2	ZAND	140
9.3	KLEI	140
9.4	CONCLUSIES	142
10	REKENREGELS	144
10.1	STERKTE EN STIJFHEID VAN BEVROREN GROND	144
10.2	RELATIE SEGREGATIEPOTENTIAAL EN TEMPERATUURGRADIËNT	146
10.3	FRACTIE ONBEVROREN WATER	148
10.4	VRIESDRUKKEN EN PERMEABILITEIT	150
10.5	THERMALE STROMINGSBEREKENINGEN	151
10.5.1	Inleiding	151
10.5.2	Analytisch model	152
10.5.3	Conclusies temperatuurberekeningen	156
11	AANBEVELINGEN VOOR ONTWERP EN UITVOERING	158
11.1	GEOLOGISCH, GEOMECHANISCH EN GEOHYDROLOGISCH ONDERZOEK AGF	158
11.2	LABORATORIUMONDERZOEK CRYOGENE EIGENSCHAPPEN	159
11.3	CONTROLE VAN TEMPERATUUR EN WATERDICHTHEID	160
11.4	CONTROLE VAN VRIESSPANNING EN DEFORMATIE	161
11.5	UITVOERINGSPROBLEMEN EN MAATREGELEN	162
12	CONCLUSIES	164
13	AANBEVELINGEN VOOR NADER ONDERZOEK	167
14	LITERATUUR	169

BIJLAGEN MEETGEGEVENS

ALGEMEEN:

A	DV1 - Activiteitenlogboek (KMW)
B	DV2 - Activiteitenlogboek (KMW)
C1	Positie van segmentringen, westbuis (KMW tek. W-TU3-VBO-527-g)
C2	Ingemeten positie van temperatuursensoren in meetlansen, oostbuis DV1 (KMW tek. W-TU4-HC5-851-c)
C3	Ingemeten positie van temperatuursensoren in meetlansen, oostbuis DV2 (KMW-tek. W-TU4-HC5-852-a)
C4	Temperatuursensoren op staalsegmenten, oostbuis (KMW tek. W-TU3-VBO-665-d)
C5	Positie temperatuursensoren, westbuis (KMW- tek. W-TU4-BT3-001)
D	Tabel locatie-opnemers DV1 en DV2 (Metingen B)

DWARSVERBINDING 1:

E1	Temperaturen vriesinstallatie-DV1
E2	Temperatuurmeetlans T1 (vanuit de oostbuis)
E3	Temperatuurmeetlans T2 (vanuit de oostbuis)
E4	Temperaturen van de tunnelsegmenten van de westbuis bij DV1
E5	Temperaturen van thermosensoren TE1 en waterspanningsmeter VW1
E6	Temperaturen van Stress Monitoring Stations SM1 en SM2b
E7	Temperaturen van Spade Cellen SC1, SC2, SC3 en SC4
E8	Temperaturen bij data-aquisitiesysteem aan maaiveld bij DV2
F1-a	Absolute spanningen van Stress Monitoring Station SM1
F1-r	Relatieve spanningen van Stress Monitoring Station SM1
F2-a	Absolute spanningen Stress Monitoring Station SM2b
F2-r	Relatieve spanningen Stress Monitoring Station SM2b
F3-a	Absolute spanningen van Spade Cell SC1
F3-r	Relatieve spanningen van Spade Cell SC1
F4-a	Absolute spanningen van Spade Cell SC2
F4-r	Relatieve spanningen van Spade Cell SC2
F5-a	Absolute spanningen van Spade Cell SC3
F5-r	Relatieve spanningen van Spade Cell SC3
F6-a	Absolute spanningen van Spade Cell SC4
F6-r	Relatieve spanningen van Spade Cell SC4
F7-a	Absolute waterspanningen SC1-SC4, SM1-SM2b en VW1
F7-r	Relatieve waterspanningen SC1-SC4, SM1-SM2b en VW1
F8-a	Vergelijk SM1-2b en SC1 (absolute grondspanning evenwijdig vs datum)

F8-r	Vergelijk SM1-2b en SC1 (relatieve grondspanning evenwijdig vs datum)
F9-a	Vergelijk SM1-2b en SC4 (absolute grondspanning loodrecht vs datum)
F9-r	Vergelijk SM1-2b en SC4 (relatieve grondspanning loodrecht vs datum)
G1-a	Absolute waterspanningen van VW1
G1-r	Relatieve waterspanningen van VW1
G2	Absolute waterspanning hart dwarsverbinding 1 (KMW-meting)
H1	Absolute deformatie extensometer EX1
H2	Absolute deformatie extensometer EX2
H3	Absolute deformatie hellingmeetbuis HE1 (meetserie A-richting)
H4	Absolute deformatie hellingmeetbuis HE1 (meetserie B-richting)
H5	Absolute deformatie hellingmeetbuis HE2 (meetserie A-richting)
H6	Absolute deformatie hellingmeetbuis HE2 (meetserie B-richting)
I	Tijdgrafieken van verplaatsingen A-punten bij DV1
J	2D-plots met verplaatsingen A-punten bij DV1

DWARSVERBINDING 2:

K1	Temperaturen vriesinstallatie-DV2
K2	Temperaturen van meetlans T1 (vanuit oostbuis)
K3	Temperaturen van meetlans T2 (vanuit oostbuis)
K4	Temperaturen van tunnelsegmenten van de westbuis bij DV2
K5	Temperaturen van waterspanningsmeters VW3 en VW4
K6	Temperaturen van Stress Monitoring Stations SM3 en SM4
K7	Temperaturen van Spade Cellen SC5, SC6, SC7 en SC8
K8	Temperaturen van thermosensoren TE2
K9	Temperaturen bij data-aquisitiesysteem aan maaiveld bij (DV1)
L1-a	Absolute spanningen van Stress Monitoring Station SM3
L1-r	Relatieve spanningen van Stress Monitoring Station SM3
L2-a	Absolute spanningen Stress Monitoring Station SM4
L2-r	Relatieve spanningen Stress Monitoring Station SM4
L3-a	Absolute spanningen van Spade Cell SC5
L3-r	Relatieve spanningen van Spade Cell SC5
L4-a	Absolute spanningen van Spade Cell SC6
L4-r	Relatieve spanningen van Spade Cell SC6
L5-a	Absolute spanningen van Spade Cell SC7
L5-r	Relatieve spanningen van Spade Cell SC7
L6-a	Absolute spanningen van Spade Cell SC8
L6-r	Relatieve spanningen van Spade Cell SC8
L7-a	Absolute waterspanningen SC5-SC8, SM3-SM4 en VW3-VW4
L7-r	Relatieve waterspanningen SC5-SC8, SM3-SM4 en VW3-VW4

M1-a	Absolute waterspanningen van VW ₃
M1-r	Relatieve waterspanningen van VW ₃
M2-a	Absolute waterspanningen van VW ₄
M2-r	Relatieve waterspanningen van VW ₄
M ₃	Absolute waterspanning hart dwarsverbinding 2 (KMW-meting)
N ₁	Absolute deformatie extensometer EX ₃
N ₂	Absolute deformatie extensometer EX ₄
N ₃	Absolute deformatie hellingmeetbuis HE ₃ (meetserie A-richting)
N ₄	Absolute deformatie hellingmeetbuis HE ₃ (meetserie B-richting)
N ₅	Absolute deformatie hellingmeetbuis HE ₄ (meetserie A-richting)
N ₆	Absolute deformatie hellingmeetbuis HE ₄ (meetserie B-richting)
O	Tijdgrafieken van verplaatsingen A-punten bij DV ₂
P	2D-plots met verplaatsingen A-punten bij DV ₂

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 2.1	Langsdoorsnede van de dwarsverbinding (ontwerptekening KMW)	5
Figuur 2.2	Schematische weergave van de groei van een ijslichaam door middel van met 22 vrieslansen.	5
Figuur 2.3	De relatie vriesdruk en permeabiliteit (aangepast naar Kofoed & Doran, 1996 en Hölting, 1989)	13
Figuur 3.1	Kaart van de trajecten van de geboorde hoofdtunnels, de locatie van de dwarsverbindingen en de ligging van profiel A-A' op de zuidoever van de Westerschelde.	27
Figuur 3.2	Profiel A-A' met de diepteligging van de onderscheiden geotechnische eenheden Z1, BK1, BK2 en GZ2 op basis van geprojecteerde sonderingen en boringen. Voor locatie van profiellijn A-A' zie Figuur 3.1.	29
Figuur 3.3	Resultaten van korrelgrootte-analyses van boormonsters van SM-o2 (bij DV1) en HE-o4 (bij DV2).	31
Figuur 3.4	Verloop van de korrelgrootte-verdeling in boring HE-o4 bij DV2 (μm = micrometer).	32
Figuur 3.5	Watergehalte w en volumetrisch gewicht van grondmonsters uit de boring HE-o4 bij DV2.	33
Figuur 3.6	Geofysische boorgatmetingen in boorgat SM-o4: (1) natuurlijke gamma straling, (2) dichtheidslog, (3) berekende porositeit op basis van neutronlog (NEU) en (4) berekende porositeit op basis van dichtheid (DEN).	35
Figuur 3.7	Resultaten van schuifsterkte metingen in BK1, BK2 en GZ2 bij dwarsverbinding DV2.	34
Figuur 3.8	Verloop van het zoutgehalte met de diepte in boring HE-o4. Er is aangegeven normale waarden zijn voor zeewater, en waar de grens zout - brak ligt. Verder is het verloop van Cl^- handmatig geëxtrapoleerd naar de top van BK1. Het blijkt dat daar de Cl^- waarden het niveau bereiken van zeewater.	35
Figuur 3.9	Sondering S24 met geotechnische interpretatie en gemeten water-spanningen. metinterpretatie van geotechnische eenheden (H = Holocene).	37
Figuur 3.10	Schematisch profiel van de Klei van Boom op basis van boringen met hoofdlithologie en voorkomen zandlaagjes en – lensjes. DV1 en DV2 liggen tussen de boringen 2 en 4.	39
Figuur 4.1	Uni-axiale druksterkte als functie van de temperatuur voor BK1, BK2 en GZ2.	43
Figuur 4.2	Testresultaten van axiale bevriezing van het Laagpakket van Boom. De lithologische samenstelling van de grond is siltige klei. (gedraineerde test FR21; zie TNO-NITG, 2000).	48
Figuur 4.3	Testresultaten van axiale bevriezing van monsters uit de Formatie van Twente. De lithologische samenstelling is fijn zand (gedraineerde test FR3; zie TNO-NITG, 2000).	49
Figuur 5.1	Bepaling van de thermische geleidbaarheid volgens Johansen (1975).	53
Figuur 6.1	Steiger met vrieslansen bij DV1.	57

Figuur 6.2	Situatie bij DV ₁ van vrieslansen en F ₁₀₀ monitoringapparatuur; bovenaanzicht (SM _{2b} is de vervangende locatie van SM ₂).	60
Figuur 6.3	Situatie bij DV ₁ van vrieslansen en F ₁₀₀ monitoringapparatuur; verticale oost-west doorsnede. Voor nader specificaties van de in deze figuur gebruikte instrumentcoderingen wordt verwezen naar Bijlage D in Deel 2.	61
Figuur 6.4	Situatie bij DV ₂ van vrieslansen en F ₁₀₀ monitoringapparatuur	67
Figuur 6.5	Situatie bij DV ₂ van vrieslansen en F ₁₀₀ monitoringapparatuur; verticale oost-west doorsnede. Voor nader specificaties van de in deze figuur gebruikte instrumentcoderingen wordt verwezen naar Bijlage D in Deel 2.	68
Figuur 6.6	links: Spade Cell; het ronde witte stipje is de waterspanningsmeter en in de witte rechthoek wordt de gronddruk gemeten.	69
Figuur 6.7	rechts: Stress Monitoring Station met 3D-metingen van gronddruk.	69
Figuur 7.1	Meetgegevens van absolute waterspanning in het hart dwarsverbinding 2 en aanbrengen van isolatie.	86
Figuur 7.2	Positie van HE ₁ en HE ₂ t.o.v. DV ₁ .	99
Figuur 7.3	Temperatuur van de stalen tunnelsegmenten bij de oostbuis van DV ₁	97
Figuur 7.4	Temperatuur bij sensoren F ₁ , F ₂ en F ₃ van de stalen tunnelsegmenten bij de westbuis van DV ₁	98
Figuur 7.5a	Vervormingen A-punten A ₀₁ -A ₀₅ bij DV ₀₁ , west; een positieve waarde komt overeen met een vervorming in de richting van de buitenkant van de tunnel; een negatieve waarde in de richting van de binnenkant.	99
Figuur 7.6	2D-presentatie van de vervormingen van de tunnelbuis bij DV ₁ op 25 mei 2000.	100
Figuur 7.7	Vervorming als functie van de afstand op de hoogte waarbij de grootste vervormingen optraden bij DV ₁ op 25 mei 2000.	101
Figuur 7.8	Verzamelde 2D-plots van verplaatsingen van de tunnelsegmenten van westbuis bij DV ₁ .	102
Figuur 7.9	Steekmetingen van DV ₁ , west	103
Figuur 7.10	Steekmetingen DV ₁ , oost	104
Figuur 7.11	Verloop van de waterdruk U ₁ gedurende de grondbevriezing van DV ₁	106
Figuur 7.12	Overzicht van temperatuurmetingen van de oostbuis (T#B#), tunnel-verplaatsing van de tunnelsegmenten van de westbuis (v#) en de waterdruk van het overdrukventiel DV ₁ (Van der Meijden, 2001).	107
Figuur 8.1	Positie van HE ₃ en HE ₄ t.o.v. DV ₂	125
Figuur 8.2	Temperatuur van de staaltubbing oostbuis DV ₂ op verschillende posities.	128
Figuur 8.3	Temperatuur van de stalen tunnelsegmenten bij de westbuis van DV ₂ .	128
Figuur 8.4	Vervormingen A-punten bij DV ₂ , west, A-punten A ₀₁ , A ₀₂ , A ₀₄ en A ₀₅ .	130

Figuur 8.5	Vervormingen bij DV 2, west, A-punten A10, A11, A13 en A14.	130
Figuur 8.6	Verzamelde 2D-plots van verplaatsingen van de tunnelsegmenten van westbuis bij DV2	131
Figuur 8.7	Steekmetingen DV 2, west	133
Figuur 8.8	Steekmetingenmetingen DV 2, oost	133
Figuur 8.9	Overzicht van temperatuurmetingen van de oostbuis (T#B#), tunnel vervormingen van de westbuis (max#) en de waterdruk van het overdrukventiel DV2.	134
Figuur 9.1	Vergelijking grondspanningen evenwijdig aan de vrieslansen.	138
Figuur 9.2	Vergelijking grondspanningen loodrecht op de vrieslansen.	138
Figuur 9.3	Deformaties boven de dwarsverbinding.	139
Figuur 9.4	Vergelijking grondspanningen verticaal langs de dwarsverbinding	139
Figuur 9.5	Situatieschets van de asymmetrische vorm van de bevroren grondlichaam.	141
Figuur 9.6	Vergelijking van lineaire deformatie van de tunnelsegmenten bij DV2 en radiale verplaatsing in een 3D-vorstheffingsproef.	143
Figuur 10.1	De sterkte van zanden en kleien als gevolg van grondbevriezing (aangepast naar Bourbonnais & Ladanyi, 1985a,b).	146
Figuur 10.2	De relatie tussen de temperatuurgradiënt T en de vorstheffingssnelheid h van vriesproeven met grondmonsters uit BK1 en BK2.	148
Figuur 10.3	Fractie onbevroren water W_u van de klei van Boom BK1 en BK2 en het zand Z1 als functie van de temperatuur	149
Figuur 10.4	De relatie vriesdruk en permeabiliteit (aangepast naar Kofoed & Doran, 1996 en Hölting, 1989)	151
Figuur 10.5	Vergelijking van gemeten en berekende temperatuurvarianten met drie varianten bij monitoring stations VW1 en SM1.	155
Figuur 10.6	Vergelijking van gemeten en berekende temperatuurberekening met drie rekenvarianten bij temperatuursensoren T1B4 en T2B4.	156

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 2.1	Geïdentificeerde risico's van kunstmatige grondbevriezing bij de aanleg van dwarsverbindingen.	6
Tabel 2.2	Vorstgevoeligheid van verschillende grondsoorten (naar ISSMFE, 1989)	14
Tabel 2.3	Onbevoren deel van formatiewater in bevroren grond van zand en klei (volgens rekenmethodiek van Anderson & Tice, 1972).	17
Tabel 3.1	Korrelfracties van de onderscheiden geotechnische eenheden.	28
Tabel 3.2	Watergehalte en nat volumiek gewicht	30
Tabel 3.3	Volumiek gewicht bepaald met geofysische boorgatmeting	31
Tabel 3.4	Berekende porositeit op basis van POR-DEN boorgatmetingen.	31
Tabel 3.5	Doorlatendheden ter plaatse van de zuidoever van de Westerscheldetunnel (WOV 1995).	33
Tabel 3.6	Resultaten van doorlatendheidsmetingen BK1 (monsters van diepte 29 m-mv).	33
Tabel 3.7	Atterbergse grenzen van BK1 en BK2 (WOV, 1995)	33
Tabel 3.8	Zoutgehaltes van geotechnische eenheden	39
Tabel 3.9	In-situ en waterspanningen bij DV1 en DV2.	38
Tabel 3.10	Classificatie van de vorstgevoeligheid van de grondsoorten bij DV1 en DV2.	38
Tabel 3.11	Samenvatting van grondeigenschappen van onbevoren grondsoorten bij DV1 en DV2. De gegevens in de grijze banden zijn afkomstig van WOV (1995).	41
Tabel 4.1	Kruipparameters A, B en C bij $T = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ van BK1, BK2 en GZ2 (volgens KMW en Jessberger, 1998)	48
Tabel 4.2	Rekenwaarden van wrijvingshoek ϕ , cohesie c elasticiteit E van bevroren grondsoorten bij $T = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Jessberger, 1998).	48
Tabel 4.3	Rekenwaarden van wrijvingshoek ϕ , cohesie c elasticiteit ϵ van bevroren grondsoorten bij $T = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Jessberger, 1998).	49
Tabel 5.1	Thermale eigenschappen van minerale grond en water/ijs (Harris, 1995)	50
Tabel 5.2	Partiële conductiviteiten volgens Johansen (1975)	52
Tabel 5.3	Geleidbaarheid van Z1 (γ_{dr} = droge volumieke massa, k_w = kwartsgehalte, S_r = verzadigingsgraad)	52
Tabel 5.4	Geleidbaarheid van BK1 en BK2 (γ_{dr} = droge volumieke massa, k_w = kwartsgehalte, S_r = verzadigingsgraad)	52
Tabel 5.5	Concentraties zoutgehalte in de geotechnische eenheden bij DV1 en DV2	58
Tabel 6.1	Overzicht van monitoringprogramma bij DV1.	59
Tabel 6.2	Overzicht meetfrequentie bij DV1	60
Tabel 6.3	Overzicht van monitoringprogramma bij DV2.	62
Tabel 6.4	Overzicht meetfrequentie bij DV2	67
Tabel 6.5	Metingen van grondspanningen ter plaatse van de opnemers bij DV1. De meeste rechtse kolom is het verschil tussen de nulmeting en de gemeten eindwaarde na de vries-dooi cyclus.	70

Tabel 6.6	Metingen van grondspanningen ter plaatse van de opnemers bij DV2. De rechter kolom is het verschil tussen de nulmeting ende gemeten eindwaarde na de vries-dooi cyclus.	71
Tabel 6.7	Resultaten beproeving spuitbeton dwarsverbinding 1.	72
Tabel 6.8	Resultaten beproeving spuitbeton dwarsverbinding 2.	72
Tabel 7.1	Vergelijk gemeten spanningen ten opzichte van de positie van de opnemers	80
Tabel 7.2	Relatieve spanningsveranderingen van de periode vriezen tot aan de periode van ontgraven. De spanningsveranderingen zijn afgerond op 5 kPa.	88
Tabel 7.3	Relatieve spanningsveranderingen tijdens de periode van ontwatering. De spanningsveranderingen zijn afgerond op 5 kPa.	89
Tabel 7.4	Relatieve spanningsveranderingen tot aan de periode vriezen- ontgraven. De spanningsveranderingen zijn afgerond op 5 kPa.	87
Tabel 7.5	Relatieve spanningsveranderingen tot en met de periode vriezen-q bekleden. De spanningsveranderingen zijn afgerond op 5 kPa.	89
Tabel 7.6	Relatieve spanningsveranderingen tot en met de periode vriezen op lager capaciteit. De spanningsveranderingen zijn afgerond op 5 kPa.	90
Tabel 7.7	Relatieve spanningsveranderingen voor de periode tot en met dooien. De spanningsveranderingen zijn afgerond op 5 kPa.	97
Tabel 8.1	Vergelijk gemeten spanningen ten opzichte van de positie van de opnemers	113
Tabel 8.2	Relatieve spanningsveranderingen die optreden gedurende de periode tot 0 °C. Aangegeven zijn de spanningsveranderingen van maximum tot minimum of vice versa en niet de waarden ten opzichte van de nulmetingen.	118
Tabel 8.3	Relatieve spanningsveranderingen die optreden gedurende de periode vanaf °oC tot de start van ontgraven. Aangegeven zijn de spanningsveranderingen van maximum tot minimum of vice versa en niet de waarden ten opzichte van de nulmetingen. De spanningsveranderingen zijn afgerond op 5 kPa.	120
Tabel 8.4	Relatieve spanningsveranderingen die optreden gedurende de periode van ontgraving. Aangegeven zijn de spanningsveranderingen van maximum tot minimum of vise versa en niet de waarden ten opzichte van de nulmetingen. De spanningsveranderingen zijn afgerond op 5 kPa.	121
Tabel 8.5	Relatieve spanningsveranderingen die optreden gedurende de periode na ontgraven tot aan start op 33% vriezen. Aangegeven zijn de spanningsveranderingen van maximum tot minimum of vice versa en niet de waarden ten opzichte van de nulmetingen. De spanningsveranderingen zijn afgerond op 5 kPa.	123

Tabel 8.6	Relatieve spanningsveranderingen die optreden gedurende de dooi periode. Aangegeven zijn de spanningsveranderingen van maximum tot minimum of vise versa en niet de waarden ten opzichte van de nulmetingen. De spanningsveranderingen zijn afgerond op 5 kPa.	124
Tabel 9.1	Samenvatting observaties DV1 en DV2	140
Tabel 10.1	Berekende elasticiteitsmodulus bij verschillende grondsoorten op basis van Johnston (1981).	146
Tabel 10.2	Resultaten van berekeningen van SP_o en vorstgevoeligheid op basis van segregatiepotentiaal.	148
Tabel 10.3	α en β waarden gebruikt voor het HSL-Zuid onderzoek (TNO-NITG, 2000).	149
Tabel 10.4	Gemeten waarden voor dichtheid, watergehalte, λ , $C_{onbevroren;vol}$ en $C_{bevroren;vol}$. Berekende waarden voor $C_{transitie;vol}$	
Tabel 11.1	Risico's en aanbevolen maatregelen bij AGF	163

GROOTHEDEN EN SYMBOLEN

<i>Grootheden</i>	<i>symbool</i>	<i>(SI-)eenheid</i>
Bezwijk deviatorspanning	q_u	kPa
Cohesie	c	kPa
Cohesie – geconsolideerd, ongedraineerd	c_{cu}	kPa
Vervorming (deformatie)	ε	% of [-]
Deviatorspanning	q	kPa
Dichtheid	ρ	kg / m ³
Druk, spanning	σ	kPa
Effectieve spanning – radiaal (σ_z, σ_r)	σ' -radiaal	kPa
Effectieve spanning – axiaal (σ_a)	σ' -axiaal	kPa
Elasticiteitsmodulus	E	kPa
Elasticiteitsmodulus E_{50}	E'_{50}	kPa
Enthalpie	H	J/m ³
Hydraulische doorlatendheid	k	m/s
Grondspanning	p	kPa
Migratiesnelheid van vorstfront	v	m/s
Permeabiliteit	k	m ²
Porositeit	P	%
Segregatiepotentiaal	SP	mm ² / (s.°C)
Soortelijke warmte (warmtecapaciteit)	c	kJ / (kg.°C)
Temperatuur	T	°C
Temperatuurgradiënt	grad T	°C / mm
Thermale conductiviteit	λ	W/(m.K)
Verzadigingsgraad	S_R	%
Volumiek gewicht – droog	γ_{dr}	kN/m ³
Volumiek gewicht – nat (natuurlijk)	γ_{nat}	kN/m ³
Volumiek gewicht – nat verzadigd	γ_{sat}	kN/m ³
Vorstheffingssnelheid	ξ	mm/dag
Void ratio / poriëngetal	e	-
Warmtecapaciteit	c	kJ/kg.°C
Watergehalte	w	%

¹ De term ‘grondspanning’ is de korrelspanning + waterspanning. De effectieve spanning is, in onbevroren staat, de korrelspanning. Wanneer grond bevroren is wordt de grondspanning (gemeten met stress monitoring stations en de spade cellen) opgevat als de cumulatieve spanning van korrel en ijs.

1. HET PROJECT F100

1.1. GRONDBEVRIEZING VOOR DE AANLEG VAN DWARSVERBINDINGEN

Bij de bouw van de Westerscheldetunnel worden ten behoeve van de aanleg van de dwarsverbindingen grondbevriezingstechnieken gebruikt. Bij de eerste en tweede dwarsverbinding, die liggen onder de zuidoever van de Westerschelde in de Willemskerkhofpolder direct ten westen van Terneuzen, zijn speciale metingen verricht in het kader van het praktijkonderzoek F100.

Informatie over het tunnelontwerp en de grondbevriezing van de dwarsverbindingen van de Westerscheldetunnel is gepubliceerd in Van de Linden et al. (1997) en Hass et al. (2000).

De metingen worden zowel in de grond als in de tunnelconstructie gedaan om de (geo-)mechanische en thermische effecten van de grondbevriezing zo volledig mogelijk te kunnen bestuderen. De dwarsverbindingen zijn aangelegd gedurende het voorjaar en de zomer van 2000. De resultaten van de bewerking en analyse van de monitoring van de grondbevriezing bij dwarsverbinding-1 (DV1) en dwarsverbinding-2 (DV2) worden met dit rapport aan het COB overgedragen.

1.2. DOELSTELLINGEN VAN DE ANALYSE

Voor de evaluatie van meetdata van grondbevriezing bij de Westerscheldetunnel zijn drie doelstellingen geformuleerd:

Evaluatie van meetgegevens gedurende het vriesproces:

- temperatuur van de grond;
- grond- en waterspanningen;
- deformaties van de grond;
- waterdichtheid van het vrieslichaam.

Evaluatie van effecten op de hoofdtunnelconstructie gedurende het vriesproces:

- temperatuur van de tunnelsegmenten;
- verplaatsing van de tunnelsegmenten;
- aansluiting van het ijslichaam op de hoofdtunnelbuizen.

Meer inzicht verkrijgen in praktische aspecten van de uitvoering die bij de aanleg van dwarsverbindingen met behulp van de grondbevriezingsmethode van belang zijn.

Alle gegevenstypen die relaties hebben met de bovenstaande onderwerpen zijn geanalyseerd binnen dit deelproject van de F100-praktijkcommissie. De omvang, het karakter en de kwaliteit van de meetgegevens maakt het mogelijk om ook in de toekomst uitgebreide analyses uit te voeren op deelonderwerpen.

1.3. GEPLANDE PROJECTACTIVITEITEN

Voor de bewerking en evaluatie van de meetgegevens zijn vier projectactiviteiten gedefinieerd waarvan de resultaten in deze rapportage zijn vastgelegd.

Activiteit 1: Lagenmodel en grondparameters

Specifieke geologische en geohydrologische eigenschappen en drainagecondities van bevroren grondlagen hebben effect op het uitzettingsgedrag van de grond. Daarom is bij deze evaluatie de structuur van de te bevriezen grond en de voor het vriesproces relevante eigenschappen van de grondlagen bij dwarsverbindingen 1 en 2 (DV1, DV2) onderzocht. Hiervoor is gebruik gemaakt van boringen, sonderingen, laboratoriumonderzoek en boorgatmetingen.

Activiteit 2: Geotechnische analyse van gegevens metingen A en B

Praktijkmetingen

De gegevens van het monitoringprogramma van het praktijkonderzoek F100 die in deze analyse gebruikt worden zijn ingedeeld in twee categorieën:

- Metingen A: metingen aan de deformatie van de tunnelsegmenten en temperaturen van de segmenten (uitgevoerd door Combinatie Middelplaat Westerschelde, KMW).
- Metingen B: metingen aan gronddeformatie, –spanningen en grondtemperaturen (uitgevoerd door F100).

Temperatuuranalyse

De temperatuur van de grond wordt vergeleken met de temperatuur van vrieslansen en de berekende temperatuur op basis van uit de literatuur beschikbare rekenregels. De verschillen tussen de berekende temperatuurverdeling en de gemeten temperaturen worden toegelicht. Mechanische en thermische processen bij de dwarsverbindingen zijn kwalitatief geïnterpreteerd en worden gerelateerd aan activiteiten van KMW en op tijdassen gepresenteerd.

Deformatie van hoofdtunnelbuizen

De evaluatie van deze metingen heeft betrekking op de deformaties van de tunnelsegmenten tijdens de grondbevriezing en de ontgraving. De temperatuurontwikkeling van de segmenten en de deformatie wordt gerelateerd aan de uitzetting en de temperatuur van de grond.

Activiteit 3: Koppeling van F100-metingen, laboratoriumgegevens en rekenregels

De resultaten van uitgevoerd laboratoriumonderzoek naar uitzettingsgedrag van bevroren grond (TNO-NITG, 2000; Côté et al., 2000; Rijkers et al., 2000) worden vergeleken met de resultaten van de F100-meetcampagne.

De vervormingsanalyse van de grond wordt vergeleken met de meetresultaten van het experimentele onderzoek aan de Klei van Boom en de Formatie van Twente (zanden) van het HSL-Zuid onderzoek.

Op basis van de verkregen resultaten zijn voor zover mogelijk praktijk- en vuistregels gegeven voor het schatten van het grondgedrag bij bevriezing en de invloed op de tunnelconstructie.

Activiteit 4: Rapportage met conclusies en aanbevelingen

De resultaten van de analyse van de F100-praktijkmetingen bij de Westerscheldetunnel worden vertaald naar praktische aanbevelingen voor toekomstige projecten met vriesactiviteiten in andere grondsoorten.

1.4. LEESWIJZER

Beschikbare achtergrondinformatie en praktijkervaring betreffende grondbevriezingsprojecten worden in *Hoofdstuk 2* behandeld. Dit hoofdstuk is tevens bedoeld als inleiding van kunstmatige grondbevriezing en gaat in op de processen in de grond.

In *Hoofdstuk 3* worden de relevante grondeigenschappen bij DV1 en DV2 besproken.

In *Hoofdstuk 4* wordt het onderzoek naar bevroren grond van de aannemer KMW toegelicht.

In *Hoofdstuk 5* worden algemene thermische eigenschappen uit de literatuur van bevroren grond besproken.

In *Hoofdstuk 6* wordt een overzicht van het uitgevoerde F100-monitoring-programma gegeven.

De geotechnische analyse van de veldmetingen worden in *Hoofdstuk 7 en 8* (*resp. dwarsverbinding 1 en dwarsverbinding 2*) behandeld.

In *Hoofdstuk 9* worden de F100 veldmetingen vergeleken met de 3D-vorstheffing- laboratoriumproeven die zijn uitgevoerd voor de Groene Hart tunnel en de Westerscheldetunnel (TNO-NITG, 2000).

In *Hoofdstuk 10* worden enige praktische reken- en vuistregels over deformatie van grond toegepast op dwarsverbinding DV1 en DV2

In *Hoofdstuk 11* worden praktische aanbevelingen voor het ontwerp en de uitvoering gegeven voor projecten met kunstmatige grondbevriezing.

In *Hoofdstuk 12* staan de conclusies en in *Hoofdstuk 13* worden aanbevelingen voor toekomstig wetenschappelijk onderzoek gedaan.

2. KUNSTMATIGE GRONDBEVRIEZING

2.1. GRONDBEVRIEZING IN DE PRAKTIJK

Kunstmatige grondbevriezing ('artificial ground freezing' = AGF) wordt al meer dan 100 jaar toegepast als grondverbeteringstechniek bij de bouw van constructies aan het maaiveld. Grondbevriezing wordt in de bouw toegepast om een tijdelijk hogere sterkte en hydraulische ondoorlatendheid te bewerkstelligen. Vanaf 1970 is het internationale onderzoek aan bevroren grond in een stroomversnelling geraakt. De vier meest gebruikte toepassingen van grondbevriezing zijn:

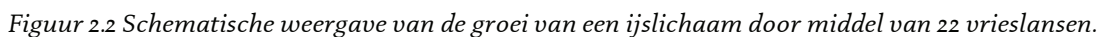
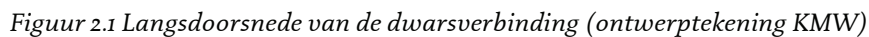
- Schachtenbouw. De aanleg van verticale schachten vanaf het maaiveld; de vrieslansen zijn dan verticaal in de grond geplaatst.
- Dwarsverbindingen. De aanleg van horizontale dwarsverbindingen tussen tunnelverbindingen onderling of naar een verticale vluchtschacht; de vrieslansen zijn dan (sub-)horizontaal in de grond geplaatst.
- Aanleg startblok voor TBM. Het startblok voor een Tunnel Boor Machine wordt aangelegd door kunstmatige grondbevriezing. Op deze manier wordt een waterondoorlatende en sterke constructie gemaakt. De bevroren grond wordt bij de start van het tunnel boorproces door de snijtanden van de TBM verwijderd. Deze techniek wordt gebruikt in combinatie met diepwanden.
- Kleinschalige toepassingen. De mogelijkheden voor kleinschalig gebruik bij constructie van infrastructuur en gebouwen zijn velerlei. De doelstellingen van grondbevriezing zijn dan hierbij verhoging van stabiliteit en het ondoorlatend maken van keerwanden en tijdelijke funderingen.
- Bevriezen van de grond kan tevens gebruikt worden als noodmaatregel bij lekkages en calamiteiten.

De CUR/COB-commissie M530 heeft in 1998 het rapport "Grondbevriezing uitvoeringspraktijk" gepubliceerd. De doelstelling van deze studie betrof vastlegging van de onderzoeks- en uitvoeringspraktijk (Mesman, CUR/COB, 1999).

2.2. DWARSVERBINDINGEN VAN DE WESTERSCHELDETUNNEL

De aanleg van de dwarsverbindingen van de Westerscheldetunnel is het centrale thema van dit COB-onderzoek. In deze paragraaf wordt een samenvatting van de constructie en bouwmethode van deze dwarsverbindingen gegeven.

Wanneer de grond bevroren is, kan ontgraving, bouw en afwerking van de binnenwand van de dwarsverbinding onder atmosferische druk worden uitgevoerd.



2.3. RISICO'S BIJ DE AANLEG VAN DWARSVERBINDINGEN MET AGF

In tabel 2.1 staan door de F100-praktijkcommissie geïdentificeerde risico's bij de aanleg van dwarsverbindingen met kunstmatige grondbevriezing.

In hoofdstuk 11 worden aanbevelingen voor maatregelen gedaan.

Deze aanbevelingen zijn gebaseerd op (1) metingen van dit praktijkproject, (2) gesprekken met de KMW, (3) experimentele kennis van geomechanisch gedrag van bevroren grond en (4) literatuur.

	risico / gebeurtenis	werkfase	oorzaak
1	- tunneldeformatie en convergentie - voegverplaatsing - barsten in tunnelsegment	- grondbevriezing - aanbrengen van de dwarsconstructie	- dilatatie bevroren grond (volume expansie) - ijslensvorming - verhoging waterdruk in onbevroren kern
2	- het deursegment (in de dwarsverbinding) kan niet geopend worden omdat ijslichaam niet waterdicht is.	- openen deur - (tijdens grondbevriezing)	- te hoge temperaturen - warmteaanvoer vanuit de hoofdtunnels (aanhechting) - zout water
3	- instabiliteit / instorting - bevroren grond	- ontgraven - (tijdens grondbevriezing)	- te lage sterkte en stijfheid van bevroren grond - niet waterdicht / lekkage gedurende afgraving - temperatuurcontrole
4	- maaiveldzetting	- ontdooiing	- vries-dooi consolidatie - verplaatsing van de tunnel
5	- dwarsverbinding niet waterdicht na ontdooiing	- tijdens en na ontdooiing	- onvoldoende spuitbeton - onvoldoende folie

Tabel 2.1 Geïdentificeerde risico's van kunstmatige grondbevriezing bij de aanleg van dwarsverbindingen.

2.4. ONTWERP EN UITVOERING VAN AGF

Het ontwerp van een vrieslichaam bestaat uit een thermisch en een constructief ontwerp. Hiervan worden in deze paragraaf de belangrijkste aspecten toegelicht.

De basisinformatie die nodig is bij het plannen van de activiteiten met grondbevriezing zijn:

- doel van het project (de constructie);
- grondcondities (geologie, watergehalte, grondwater niveau, zoutgehalte grondwater, verontreinigingen, temperatuur van grond en lucht);

- civiele processen op de werklocatie;
- omgeving van de werklocatie (objecten, huizen, ondergrondse werken);
- werkomstandigheden (beschikbare ruimte, beperkingen);
- veiligheidseisen.

In Hoofdstuk 11 'Aanbevelingen Ontwerp en Uitvoering' worden praktische richtlijnen gegeven om grond te bevriezen onder Nederlandse grondomstandigheden.

2.4.1. THERMISCH EN CONSTRUCTIEF ONTWERP VRIESLICHAAM

Voor de aanleg van een vrieslichaam is het noodzakelijk dat er een thermisch en een constructief ontwerp wordt gemaakt.

Met het *thermisch ontwerp* wordt een voorspelling gedaan over de thermische ontwikkeling van een vrieslichaam. De inputparameters zijn afkomstig van de thermische eigenschappen van de grond en de vriesinstallatie.

Het *constructief ontwerp* bestaat uit een evaluatie van de benodigde vorm en omvang, de sterkte, de uitzetting en de kruipeigenschappen van het bevroren grondmassief.

Voor het thermische en constructieve ontwerp van een vrieslichaam worden normaal gesproken de volgende aspecten bestudeerd:

Benodigde vorm en omvang van een ijslichaam wordt gebaseerd op de gewenste constructie en/of de omgeving die beschermd moet worden;

Constructieve berekening met de benodigde sterkte en stijfheid van het ijslichaam bij een gekozen temperatuur;

Configuratie en het aantal vrieslansen; de onderlinge afstand en de diameter van de vriespijpen worden gekozen;

Thermische berekening van vriesspecificaties zoals bevroeringssnelheid en warmteafvoer (of koude aanvoer);

Kiezen van de vriesperiode en de vriesinstallatie;

Evaluatie van de temperatuur die met de bevroeringsmethode bereikt wordt met gekozen vriesvloeistof.

Ontwerp van het projectplan: procesplannen en werkmethoden worden gemaakt voor vriespijp-installatie, pijpconfiguratie, warmte-isolatie, instrumentatie en vriesinstallatie. De aansluiting van het ijslichaam op de (tunnel-)constructies en de waterdichtheid van het grondmassief zijn hierbij zeer relevant.

Bij de fabricage van de tunnelsegmenten worden speciale voorzieningen in het prefabbeton gemaakt voor vriespijp doorvoeringen, nooddeuren, drainagebuizen en temperatuurvoelers.

Uitvoering van speciale studies over gesignaleerde problemen (en mogelijke maatregelen) zoals (zie ook par. 2.5):

vorstheffing en kruip

vries-dooi zetting

vriesspanningen op constructies

grondwaterstromingen.

2.4.2. UITVOERING VAN DE BEVRIEZINGS ACTIVITEITEN

De voorbereidende werkprocessen bij de uitvoering van de grondbevriezing zijn als hieronder (niet in specifieke volgorde). De onderstaande lijst met werkfasen is gebaseerd op verschillende gesprekken met de firma Jessberger, KMW en literatuur (i.e. Harris, 1995).

Fase 1: Voorbereidingen

- Plaatsen van de vriespijpen
 - Boren van de gaten voor vriespijpen en voor temperatuurmeters en drainage
 - Installeren van vriespijpen en apparatuur voor temperatuurmonitoring
 - Druktesten van de vriespijpen (op lekken)
 - Meting van pijpdeviatie
 - Plaatsing van binnenpijpen en afbouw vrieslansen
- Isolatiemaatregelen
- Bedrading instrumentatie
- Keuze, aankoop en plaatsing van de vriesmachine
- Aansluiting bedrading
- Plaatsing pijpwerk voor vulling koelvloeistof
- Overige isolatiemaatregelen

Fase 2: Testen van de vriesinstallatie

- Maatregelen en bijstelling van temperatuur, druk en isolatie van vriesapparatuur

Fase 3: Start van vriesoperatie

- Vriesmachine wordt aangezet

Fase 4: Controle grondbevriezing

- Koelsysteem
- Onderhoud en inspectie
- Monitoring van temperatuur van grond en constructie
- Koelvloeistof controle
- Controle van deformatie van de constructies als gevolg van vorstheffing
- Bewaken van waterspanningen in het centrum van de ijsring (specifiek voor cirkelvormige ijslichamen)

Fase 5: Onderhoud bevroren grond

- Ontwerp van het vrieslichaam wordt vergeleken met de monitoringsgegevens (temperatuur, vorstheffing, deformatie constructies)
- Controle van de aansluiting van de bevroren grond op de constructie of wanden
- Ontgraving en plaatsing gewenste constructie

Fase 6: Beëindiging van grondbevriezing

De beëindiging van de grondbevriezing kan op verschillende manieren worden uitgevoerd:

- Natuurlijke dooi (ongecontroleerd)
- Gefaseerde dooi (vriestemperatuur in stappen afbouwen)
- Geforceerde dooi (inbrengen warmte)
- Maatregelen tegen zettingsprocessen

Fase 7: Ontmanteling vriesinstallatie

- Verwijderen van vrieslansen, meetapparatuur, isolatie, instrumentatie, etc.
- Afdichten en nabewerking van boorgaten.

2.5. MONITORING EN CONTROLE VAN DE VRIESOPERATIE

De belangrijkste parameters bij monitoring van vrieslichamen zijn:

- temperatuur van het bevroren grondmassief;
- deformatie van het maaiveld;
- deformatie van de constructie.

Op de locatie worden deze gemeten en vergeleken met de ontwerpberekeningen. Bij afwijkingen en hoge deformaties van constructies kunnen maatregelen getroffen worden (extra isolatie, drainage, temperatuur van vrieslansen, etc.). Afhankelijk van de vorm van het vrieslichaam is ook de waterspanning van belang.

Het gehele meetprogramma bij DV1 en DV2 van de Westerscheldetunnel wordt in Hoofdstuk 6, 7 en 8 zeer uitgebreid besproken. Voor meer informatie wordt hier dan ook naar verwezen.

2.6. GEOMECHANISCH GEDRAG VAN BEVROREN GROND

Het geomechanisch gedrag van bevroren grond beschrijft de sterkte, elasticiteit en uitzetting gedurende de grondbevriezing (TNO, 1998; HSL-Zuid, 1999; TNO-NITG, 2000). Het geomechanische gedrag van bevroren grond is afhankelijk van

1. temperatuur,
2. grondsoort en samenstelling,
3. de geologische gelaagdheid,
4. de heterogeniteit en doorlatendheid van grond,
5. het zoutgehalte,
6. de lokale grondwaterstroming en
7. de grondverontreinigingen.

1. Vriestemperatuur

De temperatuur heeft een groot effect op de sterkte, elasticiteit en uitzetting van de bevroren grond. In principe neemt de sterkte en stijfheid toe bij afnemende temperatuur.

2. Type grond, korrelstructuur en watergehalte

Grond is samengesteld uit een vaste fase (sedimentkorrels), een vloeibare fase (water) en een gasfase, waarbij de vaste delen variëren in vorm van ronde korrels tot minuscule plaatvormige kleideeltjes. De sterkte van de bevroren grond is afhankelijk van de verhouding tussen deze fasen en van de mineralogische samenstelling, de korrelgrootteverdeling, de plasticiteit en de microstructuur van de grond. Geomechanische eigenschappen, zoals schuifsterkte, elasticiteit en samendrukbaarheid zijn primair afhankelijk van de korrelstructuur en -distributie en het percentage onbevoren formatiewater.

3. De geologische gelaagdheid

Het in de poriën aanwezige formatiewater expandeert met een volumetoename van 9%. Deze volumetoename zou dan gelden wanneer al het water zou bevriezen en dan niet uitgedreven wordt, zoals in goed waterdoorlatend zand.

Volgens buitenlandse ervaringen met grondbevriezing treedt uitzetting op in de richting loodrecht op het vriesfront. Dit betekent dat bij bevriezing met een vrieslans de uitzetting van vorstgevoelige sedimenten zich voornamelijk in radiale richting ontwikkelt en aan de uiteinden van vrieslansen.

Van uitzettingen in de axiale richting ε_{axiaal} van het vrieslichaam (evenwijdig aan de isothermen) bestaan nauwelijks gedocumenteerde ervaringen. Recent onderzoek heeft aangetoond dat ijslichamen niet alleen in de richting loodrecht op de vrieslansen kunnen deformeren, maar tevens in mindere mate in de richting evenwijdig aan de vrieslansen (TNO-NITG, 2000).

4. Heterogeniteit en drainage-eigenschappen van de grond

Een cilindervormig vrieslichaam wordt bij grondbevriezing opgebouwd met behulp van een serie vrieslansen. Door afwisseling in de geologische gelaagdheid, variaties watergehalte en het voorkomen van (ongedraineerde) zandlenzen kunnen onregelmatige vormen in een bevroren lichaam ontstaan.

5. Zoutgehalte

De druksterkte van bevroren sedimenten wordt aanzienlijk gereduceerd door toename van het zoutgehalte (Ogata et al., 1982; Jessberger, 1982). Dit wordt verklaard uit de aanwezigheid van een verdikte overgangszone; zout is immers vriespunt verlagend. In de vrieszone bevindt zich een 'brine' die zeker aan de randen van het vrieslichaam zwaktezones vormt. Volgens de bevindingen van Chamberlain (1983) wordt hierdoor de vriesexpansie gereduceerd.

Ponomarjov (1982) liet met experimenten zien dat bij bevriezing van grofkorrelige monsters met niet-verzadigde poriën met zout water er juist volumeafname optreedt. Bij grofkorrelige monsters met een waterverzadiging van 100% treedt wel uitzetting op. Deformatie varieert van -0,13 % ($T = -10^{\circ}\text{C}$) tot 0,06 % ($T = -30^{\circ}\text{C}$). Voor meer informatie over de bevriezing van met zout water verzadigde sedimenten wordt verwezen naar TNO-NITG (1998).

6. Grondwaterstroming

De groei van een ijslichaam kan in grootte belemmerd worden door grondwaterstroming. Met het stromend water, langs het vrieslichaam, kan ook warmte worden aangevoerd. Wanneer de warmteaanvoer even sterk is als de capaciteit van de vriesinstallatie zal het vrieslichaam niet meer kunnen groeien.

In gebieden bij de kust met grote verschillen tussen eb en vloed en bij grondwaterproductiegebieden moet hierop worden gelet.

7. Grondverontreinigingen

Chemische verontreinigingen van de grond veroorzaken vaak een sterke vriespuntverlaging. Net als zout water resulteert dit in lagere stekte en niet-bevroren delen van het ontworpen vrieslichaam.

2.7. CRYOSUCTIE EN IJSLENSFORMING

Wanneer een grondmassief gedurende een langere tijd bevroren blijft en er is sprake van een temperatuurgradiënt dan blijven er specifieke grondprocessen actief die invloed kunnen hebben op de tunnelconstructie of het maaiveld. Deze worden in deze paragraaf toegelicht.

Het formatiewater kan vóór bevroering segregeren in zones van ijslenzen (Konrad & Morgenstern, 1981). Als gevolg van de groei van deze ijslenzen ontstaat er aan het vriesfront een waterspanningsgradiënt, waarbij de migratie van water onder meer afhankelijk is van de doorlatendheid van het sediment. De zuigingspotentiaal is afhankelijk van het karakter van het sediment, ofwel van de afstand tussen de sedimentkorrels: "pore necks" (Yong & Warkentin, 1975). Dit betekent dat de ontwikkeling van een zuigingspotentiaal (capillaire werking) in klei groter is dan in waterdoorlatende zanden (Penner, 1963; Penner 1986; Sutherland & Gaskin, 1973).

Bij bevroering van sediment ontstaat dan aan het vriesfront een zone waarvan het water gedeeltelijk bevroren en gedeeltelijk onbevroren is. Om de groei van deze ijslenzen te verklaren introduceerde Miller (1972) het concept van een overgangszone ("fringe zone"). Deze zone bevindt zich tussen de bevroren zone en de onbevroren zone. Een ijslens kan niet groeien zonder temperatuurgradiënt. De groei van deze ijslenzen wordt versterkt door de aanvoer van water door onbevroren waterlaagjes tussen de sedimentkorrels. Het proces van waterverplaatsing door grondbevroering van sediment wordt cryosuctie genoemd (Penner, 1963; Czurda, 1993). De expansie van klei door bevroering is voor een deel afkomstig van de groei van ijslenzen. Konrad & Morgenstern (1981) hebben een experimentele methode voorgesteld om de deformatie door vorstheffing te berekenen (zie par. 2.8).

2.8. VORSTHEFFING, VORSTGEVOELIGHEID EN VRIESSPANNINGEN

Vorstgevoelige sedimenten zijn sedimenten waarbij significante vorstheffing (frost heave) geconstateerd wordt bij grondbevroering.

Grondsoorten die de specifieke tendens hebben om uit te zetten als gevolg van permafrost en kunstmatige bevroering worden *vorstgevoelig* genoemd. Voor significante vorstheffing zijn drie voorwaarden noodzakelijk:

1. voortdurende vriesperiode met blijvende temperatuurgradiënten,
2. vorstgevoelige grondsoort,
3. mogelijke aanvoer van water uit de omliggende onbevroren zone.

Konrad & Morgenstern (1980) beschrijven een één-dimensionaal grond-deformatiemodel ('frost heave') dat suggereert dat na ijslensvorming de grond passief reageert met betrekking tot massatransport, maar dat water wordt getransporteerd in de richting van de ijslens. Het water beweegt zich dan van onbevroren grond door de dunne zone van (gedeeltelijk onbevroren) grond naar de ijslens. De krachten die hieruit resulteren vormen een zuigingspotentiaal ('suction') in de overgangszone (de 'fringe').

Bij één-dimensionale grondbevriezing wordt een verband gevonden tussen de vorstheffing h en de temperatuurgradiënt $grad\ T$. De uitzetting van grond gedurende bevriezing vindt plaats in de richting loodrecht op het vriesfront (de isothermen):

$$SP = \frac{h}{gradT}$$

waarin:

h = snelheid van de vorstheffing [m/s]
 SP = segregatiepotentiaal bij de ijslens [mm²/ (°C. s)]
 $grad\ T$ = temperatuurgradiënt [°C/m]

De segregatiepotentiaal SP die experimenteel bepaald wordt kan ook worden uitgedrukt als functie van de suctie bij de ijslens en het vriesfront (Andersland & Ladanyi, 1999):

$$SP = \frac{h_s - h_0}{T_s} \cdot k$$

waarin:

h_s = suctie aan het lensoppervlak [m waterkolom]
 h_0 = suctie aan het vriesfront [m waterkolom]
 T_s = temperatuur bij de ijslens
 k = doorlatendheid [m/s]

Het effect van spanning op de segregatiepotentiaal SP kan als volgt worden berekend:

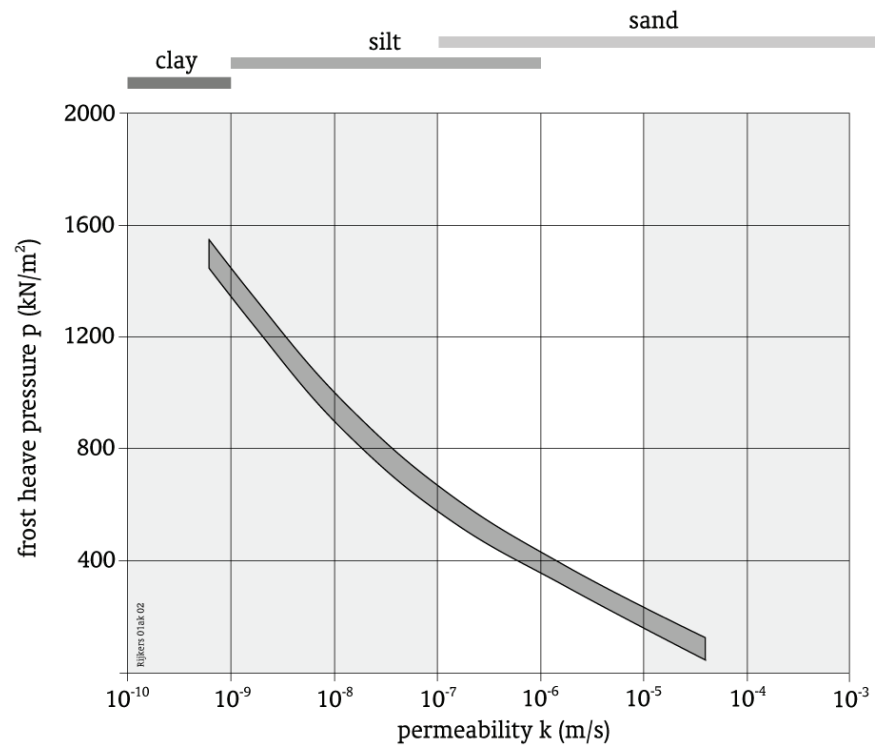
$$SP(p) = SP_0 \cdot e^{-a \cdot \sigma_n}$$

Waarin:

$SP(p)$ = segregatie potentiaal onder belasting σ_n
 SP_0 = segregatie potentiaal zonder extra belasting
 σ_n = gedefinieerd als spanning loodrecht op het vorstfront
 a = grondparameter (Konrad & Morgenstern, 1984)

Knutsson et al. (1985) vonden een sterke relatie tussen deze segregatiepotentiaal en een term R_f ('fines factor'): bij toename van de fractie klei en silt neemt de segregatiepotentiaal toe. Tabel 2.2 geeft een samenvatting van verschillende classificatie-systemen zoals die internationaal gebruikt worden (ISSMFE, 1989).

De groei van ijslenzen en de hierdoor opgebouwde grondspanningen (of 'heave pressures') zijn sterk afhankelijk van de gemiddelde korrelgrootte van een sediment. Dit wordt verklaard door de aangetoonde invloed van de grootte van de poriën op de 'heaving pressure'. Penner (1963) toonde experimenteel aan dat bij kleine diameter (20-50 μm) van de korrel grotere vriesspanningen ontstaan dan bij grote korreldiameter (60-100 μm), resp. 34 en 9,8 kPa. In grofkorrelige sedimenten (zoals zand) bevriest alleen het aanwezige water en vorstspanningen als gevolg van ijslensvorming traden nauwelijks op (Czurda & Wagner, 1985).



Figuur 2.3 De relatie vriesdruk en permeabiliteit (aangepast naar Kofoed & Doran, 1996 en Hölting, 1989)

Jessberger et al. (1990) toonde voor het ontwerp van de dwarsverbindingen in de Storebaelt-tunnel de relatie aan tussen de vriesspanning ('frost heave load') en de korrelgrootte van sediment. Hoe lager de doorlatendheid van de korrels van het sediment hoe hoger de vriesdruk gedurende de grondbevriezing. De vriesspanning in sedimenten met een doorlatendheid van $k = 10^{-9}$ m/s kan oplopen tot 1500 kN/m². Bij een doorlatendheid van $k = 10^{-4}$ m/s is de toename van de spanning, als gevolg van grondbevriezing, verwaarloosbaar (Jessberger et al., 1990; Kofoed & Doran, 1996; Fig. 2.3; in Fig. 10.3 staan de bij DV1 en DV2 gemeten spanningen).

Tabel 2.2 Vorstgevoeligheid van verschillende grondsoorten (naar ISSMFE, 1989)

vorst gevoelig- heid	plasticiteit			capillaire stijging ²	vloeigrens ³	fines factor ⁴	segregatie- potentiaal ⁵	vorstheffings- snelheid ⁶
	grondtype (USCS)	- I _p ¹	W _L of- PL¹	m H _c	- I _L	- R _f	mm²/(h.K) SP _c	mm/d
Verwaar- loosbaar	GW, GP SW, SP	< 1		< 1	≤ 0	< 2,5	< 0,5	< 0,5
Laag	CH	≥ 7	> 50	1,0 - 1,5	< 0,25	2,5 - 5	0,5 - 1,5	0,5 - 2
Matig	CI OH, MH	≥ 7 ≥ 7	35-50 > 50	1,5 - 2,0	0,25 - 0,5	5 - 10	1,5 - 3,0	2 - 4
Sterk	CL ML OL	≥ 7 < 4 ≥ 7	< 35 ≤ 50 35-50	> 2,0	> 0,5	> 10	> 3,0	> 4

GW	Goed-gegradeerd grind-zand mengsels (weinig tot geen fijne deeltjes)
GP	Slecht-gegradeerd grind en grind-zand mengsels (weinig tot geen fijne deeltjes)
SW	Goed-gegradeerd zand en grindhoudend zand (weinig tot geen fijne deeltjes)
SP	Slecht-gegradeerd zand en grindhoudend zand (weinig tot geen fijne deeltjes)
CH	Niet-organische klei van hoge plasticiteit, vette kleien
CI	Niet-organische klei van intermediaire plasticiteit
OH	Organische silten en organische siltige kleien met lage plasticiteit
MH	Niet-organische silten, mica- of diatomee-houdende fijne zanden of (elastische) silten
CL	Niet-organische klei van lage en medium plasticiteit, gravel kleien, zandige kleien, siltige kleien
ML	Niet-organische silten, zeer fijne zanden, siltige of kleiige fijne zanden
OL	Organische silten en organische siltige kleien met lage plasticiteit
⁰	USCS
¹	Merkblatt für die Vernetzung von Frostscha den in Strassen. Entwurf 03/87 (unpublished)
²	Beskow (1949)
³	SniP II-15-74
⁴	BS-5930
⁵	Konrad & Morgenstern (1981)
⁶	CRREL test (1981)

Vries-dooi consolidatie

De verandering van de structuur van klei door bevriezen en ontdooien wordt op de schaal van de korreltextuur primair toegeschreven aan heroriëntatie van deeltjes en de vorming van (hexagonale) microbreuken. Dit proces wordt door veel auteurs vergeleken met het mechanisme van consolidatie (Chamberlain, 1989; Bourbonnais & Ladanyi, 1985; Yong et al., 1982; Nixon & Morgenstern, 1973; Jessberger, 1989). Bij een vries-dooi cyclus consolideert het sediment onder de heersende verticale druk als gevolg van de herschikking van de korrels (Nixon & Morgenstern, 1973). Als gevolg van deze herschikking van korrels na een vries-dooi cyclus wordt de void-ratio verlaagd, waarmee de consolidatiegraad en de sterkte (na dooi) toenemen (TNO-NITG, 1998).

2.9. STERKTE EN KRUIP VAN BEVROREN GROND

De stijfheideigenschappen van bevroren grond zijn sterk afhankelijk van de belasting en de deformatiesnelheid (strain rate) en de duur van de belasting. ISGF (1987) adviseert een deformatiesnelheid te gebruiken van 0,1 % tot 1,0 % per minuut bij uni-axiale sterktetesten.

2.9.1. UNI-AXIALE DRUKSTERKTE EN TRIAXIALE STERKTE

Met *uni-axiale drukproeven* wordt de druksterkte q (of UCS-waarde) bepaald zonder de toepassing van een steundruk. Testresultaten worden gewoonlijk als een q/T - en E/T diagram gepresenteerd. De druksterkte van bevroren grond is sterk afhankelijk van de temperatuur en de lithologische heterogeniteit van het monster.

De *triaxiale druksterkte* van bevroren grond levert hogere waarden op dan onbevroren grond en druksterkte proeven worden vaak uitgevoerd om het Mohr-Coulomb criterium te bepalen. De wrijvingshoek ϕ en cohesie c . De resultaten van druksterkte proeven worden normaliter als p/q diagrammen gepresenteerd, waarbij de gemiddelde hoofdspanning en deviatorspanning als volgt is gedefinieerd.

$$\begin{aligned} p \text{ gemiddelde hoofdspanning} &= (\sigma_1 + \sigma_3) / 2 \\ q \text{ deviatorspanning} &= (\sigma_1 - \sigma_3) \end{aligned}$$

Met behulp van de volgende formules kunnen dan de schuifparameters met het Mohr-Coulomb criterium bepaald worden:

$$\phi = \arcsin(\tan \alpha)$$

$$c = \frac{b}{2 \cos \phi}$$

waarin:

- ϕ : wrijvingshoek [$^\circ$]
- α : omhullende van Mohr-Coulomb criterium (τ - σ_n diagram)
- c : cohesie [kPa]
- b : snijpunt Mohr-Coulomb criterium met q -as (deviatorspanning)

2.9.2. KRUIP

Met het verstrijken van de vriesperiode worden de vriesspanningen verlaagd als gevolg van krimpprocessen (Domaschuk et al., 1985; Ladanyi, 1982). Wanneer lange vriesperiodes gebruikt worden dient met krimp rekening gehouden te worden. Assur (1963) stelt dat krimp afhankelijk is van de belasting, temperatuur, tijd en materiaaleigenschappen. In krimpgedrag van bevroren grond zijn vergelijkbare fasen te onderscheiden als in onbevroren grond. Gedurende Fase 1 vindt een samendrukking plaats waarbij de krimpvervormingen afnemen.

Gedurende Fase 2 treedt een lineaire krimpvervorming op tot fase 3 intreedt. Wanneer de spanningen van de kruptest hoog genoeg zijn, zal het monster bezwijken in Fase 3. Dit heeft een grote (breuk-)vervorming tot gevolg. De breukvervorming is dan niet-reversibel.

Onderstaande functie wordt gebruikt om niet-lineaire kruip onder één-axiale belasting te karakteriseren (Thimus, 1991). De functie bestaat uit een elastische en een niet-elastische term:

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{cr} = \frac{\sigma}{E_T} + A \cdot \sigma^B \cdot t^C$$

waarin:

ε_{tot} : totale vervorming

ε_{el} : elastische vervorming

ε_{cr} : kruipvervorming

σ : uni-axiale belasting

E_T : temperatuurafhankelijke modulus

t : tijd

A, B, C : materiaal en kruipconstanten (zie Assur, 1963, Thimus, 1991)

2.10. DE ONBEVROREN WATERFRACTIE IN BEVROREN GROND

Het onbevroren watergehalte is sterk afhankelijk van het type grond. Volgens de empirisch bepaalde rekenformule van Anderson & Tice (1972) kan het onbevroren watergehalte berekend worden. Juist voor lagere temperaturen (lager dan -10°C) geldt een zeer goede correlatie (zie ook par. 4.2):

$$w_u = \alpha \cdot |\Delta T|^\beta$$

waarin:

ΔT = temperatuurdaling onder nul (uitgedrukt als positief getal in $^\circ\text{C}$)

α, β = karakteristiek van specifieke grondsoort gerelateerd aan specifieke oppervlakte

In *Tabel 2.3* staan als voorbeeld de watergehalten van bevroren monsters uit de Formatie van Naaldwijk en de Klei van Boom. Deze zijn uitgerekend met bovenstaande formule van Anderson & Tice (1972).

Bij -5°C is slechts 1,9 % van het poriënwater in zand onbevroren, terwijl het onbevroren watergehalte bij dezelfde temperatuur van klei 4,7 % bedraagt.

De waarden van α en β zijn gekozen op basis van het specifiek oppervlak en het type grond. Meer informatie over de keuze van de waarden van α en β is te vinden in *par. 10.3* en Andersland & Landanyi (1972; pag. 40).

Tabel 2.3 Onbevoren deel van formatiewater in bevroren grond van zand en klei (volgens rekenmethodiek van Anderson & Tice, 1972).

grondsoort	ΔT [°C]	α [-]	β [-]	onbevoren watergehalte w_u [%]
matig fijn zand	-0,1	5	-0,6	19,9
	-1	5	-0,6	5,0
(Formatie van Naaldwijk)	-5	5	-0,6	1,9
$w = 22 \%$	-15	5	-0,6	1,0
$k \sim 10E-9 \text{ m/s}$	-30	5	-0,6	0,7
	-50	5	-0,6	0,5
siltige klei	-0,1	9	-0,4	22,6
	-1	9	-0,4	9,0
(Klei van Boom)	-5	9	-0,4	4,7
$w = 20-24 \%$	-15	9	-0,4	3,0
$k \sim 1,5 \times 10E-4 \text{ m/s}$	-30	9	-0,4	2,3
	-50	9	-0,4	1,9

2.11. AANBEVELINGEN VOOR LABORATORIUMEXPERIMENTEN

Ten behoeve van het ontwerp van een vrieslichaam worden veelal laboratorium-experimenten uitgevoerd. De volgende aandachtsgebieden bij de laboratorium-testen van bevroren grond worden gegeven door Sayles et al. (1987):

1. Classificatie van bevroren grond

De sterkte van bevroren grond – bij een gegeven temperatuur – is een functie van het grondtype en het zoutgehalte (en eventueel de structuur van ijslenzen). Daarom wordt aanbevolen te werken met een geaccepteerd classificatiesysteem voor zowel onbevoren als bevroren grond. De volgende parameters zijn noodzakelijk voor deze algemene classificatie:

- verzadigde en bulk volumieke gewichten (kN/m^3)
- watergehalte (%) en gewicht van droog vol. gewicht.
- vloeibaarheids- en plasticiteitsgrens van onbevoren grond
- korrelgrootteverdelingen
- zoutgehalte ($\text{Cl}^- \text{ mg/l}$)

2. Deformatiesnelheid (strain rate) bij triaxiaal test

Voor de bepaling van de sterkte en de elasticiteit van bevroren grond wordt een deformatiesnelheid (strain rate) aanbevolen van 0,1 % tot 1,0 % per minuut bij uni-axiale testen.

3. Kruiptest

De belasting bij één-axiale kruiptesten hangt sterk af van het type grond (klei, silt, zand) en de gewenste vriestemperatuur. Voor kruiptesten bij constante spanning wordt aanbevolen 10, 30, 50 en 70 % van de sterkte te hanteren.

- De constante belasting bij een kruiptest moet een fractie zijn van de uni-axiale sterkte van de bevroren grond.
- Ten minste vier (constante) spanningsniveaus moeten worden gebruikt bij een kruiptest.
- Om krimpparameters te bepalen moeten de testen langer duren dan 100 uur.

- d) De standaard kruiptest wordt uitgevoerd totdat bezwijking optreedt, of totdat er deformatie is van meer dan 20 % (bij multi-level kruiptesten).

4. Temperatuurcontrole van de vriestest

De vriestemperatuur van de laboratoriumtest hangt af van de temperatuur die gebruikt wordt bij het project. Als regel worden temperaturen aanbevolen van $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bij grondmonsters met zoet poriënwater. De variatie in temperatuur zou beperkt moeten blijven tot $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

5. Testmonster, vorm en afmetingen

Zowel de vorm als de afmetingen en de gelijkmatigheid van de testmonsters kunnen invloed hebben op de testresultaten en leiden tot voortijdig bezwijken.

- a) Gelijkmatig gevormde cilindervormig monster worden sterk aanbevolen.
- b) De verhouding hoogte/diameter behoort 2 of meer zijn.
- c) De diameter van het testmonster moet minimaal 10 x zo groot zijn als de maximum korrelgrootte van het monster.

6. Meetcondities (consolidatie en drainage)

De testmonsters moeten ongestoord genomen zijn en worden geconsolideerd voordat de vriestesten aanvangen. Axiale vervorming dient te worden gemeten met extensometers die op het monster zijn aangebracht om de invloed van de deformatie van de apparatuur uit te sluiten.

7. Stijfheid en vervorming van testapparaat

De stijfheid van het testapparaat moet maximaal zijn uitgevoerd. De stijfheid van het testapparaat moet worden gemeten (geanalyseerd) en tevens worden gerapporteerd.

2.12. PRAKTIJKPROBLEMEN MET GRONDBEVRIEZING

Bevroren grond is een zeer sterk en waterondoorlatend materiaal. De kruipeigenschappen ervan hebben de neiging de spanningen te herdistribueren. Het geomechanisch gedrag van bevroren grond is primair afhankelijk van de grootte en de eigenschappen van het ijs en de heersende temperatuur, alsmede van enige texturele en geologische eigenschappen van de grondsoort. Plastische en organische kleisoorten hebben de neiging te deformeren (kruipen), ook bij lage spanningen. De resulterende verplaatsingen kunnen uitmonden in bezwijking van de vrieslansen op het grensvlak van bevroren grond en stijve constructies.

In deze paragraaf worden de meest voorkomende problemen met bevroren grondlichamen toegelicht (Konrad, 2000). Deze problemen worden in veel gevallen veroorzaakt door ontwerp- en uitvoeringsfouten.

Hieronder worden de belangrijkste overwegingen genoemd bij toepassing bij het realiseren van verticale schachten en dwarsverbindingen:

I. Bij verticale schachten (vanaf het maaiveld):

1. *Onvoldoende vriescapaciteit* kan leiden tot een continue verslechtering van het vrieslichaam. Een grotere vriescapaciteit en/of isolatie die geplaatst wordt tegen het ijslichaam (of tegen de constructiedelen die warmte aanvoeren) zijn noodzakelijk om problemen te voorkomen.
2. Slecht thermisch contact tussen de vrieslans en de grond boven de (natuurlijke) grondwaterstand kan resulteren in aanvoer van warmte. De *onverzadigde zone* zal weinig stabiliteit vertonen als gevolg van de grondbevriezing.
3. De sterkte van niet-verzadigde zanden boven de grondwaterspiegel kan na bevriezing hoog lijken. Het sediment is *niet verzadigd* met water en is dus na bevriezing ook onverzadigd met ijs. Als gevolg van sublimatie van dit ijs wordt de sterkte en stabiliteit van het bevroren grond massief significant verlaagd.
4. Wanneer het ijslichaam niet beschermd wordt tegen weersinvloeden (regenval en zonneschijn) en circulerende lucht, kan de kwaliteit van het ijslichaam sterk aangetast worden. Het aanbrengen van *isolatie*, waterdicht plastic tegen het ijslichaam kan dan problemen voorkomen.
5. Excessieve thermische koeling kan resulteren in een zeer onregelmatig ijslichaam: bv. dun aan de oppervlakte en dik aan de basis. Ook is er bij te snelle grondbevriezing met zeer lage temperaturen het gevaar van insluiting van een onbevroren grondmassief ("necking"). Omdat de expanderende grond dan niet meer gedraineerd wordt, kunnen hoge grondspanningen en deformaties ontstaan.

II. Bij de aanleg van dwarsverbindingen in de tunnelbouw:

1. Bij de aanleg van een cilindervormig ijslichaam zal een vrieslichaam moeten worden gesloten om *waterdichtheid* te bewerkstelligen. Door een correcte capaciteit en configuratie van de vriesinstallatie (vriesvloeistof, pompen en configuratie vrieslansen) te gebruiken, kan het vrieslichaam een gelijkmatige vorm krijgen.
2. *Warmteaanvoer* via reeds geplaatste tunnelsegmenten zal moeten worden vermeden door het aanbrengen van isolatiemaatregelen. Hierbij is onderscheid te maken tussen de hoofdtunnelsegmenten waar de vrieslansen doorheen steken en de segmenten die op enige afstand zijn geplaatst. Tevens is de methode voor isolatie afhankelijk van het type materiaal van de segmenten (staal versus beton).
3. Door middel van het aanleggen van drainagekanalen (in eventuele *ongedraineerde delen* van het vrieslichaam) kan de waterspanning verminderd worden, wanneer de grond nog niet bevroren is.

4. Deformatie van reeds geplaatste tunnelsegmenten zal met maximale maatregelen moeten worden geminimaliseerd, alhoewel een minimale gronddeformatie als gevolg van grondbevriezing niet te vermijden is. Deformatie van ondergrondse constructies door *ijslensvorming* kan worden voorkomen door geen constructies in de richting loodrecht op de vrieslansrichting aan te leggen.

Verlaagde sterkte en dikte van het ijslichaam, en kruipeigenschappen hebben tijdens en/of na uitgraving tot verschillende problemen geleid bij civiele bouwprojecten (Shuster, 2000). De oorzaken van dit brede spectrum aan problemen hebben in het algemeen geen onderlinge relatie en worden hieronder toegelicht.

2.12.1. GRONDWATER

De meeste problemen met grondbevriezing hebben direct of indirect te maken met grondwater. Daarom moeten de volgende onderwerpen zowel bij het ontwerp als bij de uitvoering de noodzakelijke aandacht krijgen:

1. Kwaliteit en zout water

Het verschil in geomechanisch gedrag van tussen bevroren en onbevroren grond is geheel het resultaat van de transformatie van vloeibaar water naar ijs. Organische verontreinigingen of opgeloste zouten in het water hebben effect op het vriespunt van water en dientengevolge op de sterkte en deformatie van bevroren grond. Het vriespunt van niet-vervuild zoet water bedraagt 0 °C. Het vriespunt van zeewater ligt rond ca. -2 °C. Alle mechanische eigenschappen van bevroren grond dienen gebaseerd te zijn op een specifieke vriestemperatuur die weer gerelateerd is aan het effectieve vriespunt van poriënwater.

Bevriezing van zout water kan leiden tot het uitdrijven van de zoutmineralen uit het bevroren water en het scheiden van het water in een bevroren zoet deel en onbevroren pekkel. Op deze wijze kunnen zoutwaterlenzen ontstaan die zeer moeilijk te bevroren zijn. Grondbevriezing van aquifers met zout water kan problemen opleveren met de sluiting van het bevroren grondlichaam (zie verder par. 6.7).

2. Kwantiteit

Onvoldoende grondwater in de grond boven de waterspiegel kan voor grote problemen zorgen. Bevroren grond die niet verzadigd is, kan geen tot onvoldoende verhoogde sterkte en stabiliteit verschaffen.

3. Beweging

Grondwaterstroming kan voor zgn. 'windows' in een ijsmassief zorgen, omdat hierdoor lokaal warmte wordt aangevoerd. De grondwaterstroming kan het gevolg zijn van:

- a) verticale lekken in een grondlaag door groutbewerking;
- b) regionale stromingsgradiënt door grondwaterwinning;
- c) lokale maatregelen van grondwaterdrainage;
- d) grondwaterbewegingen in doorlatende zanden gedurende AGF-activiteiten;
- e) verticale lekken bij kapotte rioleringen;
- f) natuurlijke grondwaterstroming.

2.12.2. GRONDDEFORMATIE

Grondbewegingen als direct of indirect gevolg van grondbevriezing of dooi-consolidatie geeft aanleiding tot deformatie of beweging van aanpalende constructies of bodembeweging. Hoewel gronddeformatie over het algemeen redelijk voorspelbaar is, zijn er nog geen kwantitatieve methoden om het complete proces in meer dimensies te berekenen. Gerapporteerde verticale bodem-bewegingen bij ondiepe grondbevriezingsprojecten liggen typisch in de orde van grootte van 5 cm en kunnen oplopen tot 10 cm. AGF-projecten in grondsoorten zoals organische silten en AGF-project in gedraineerde grondsoorten waarbij geen rekening is gehouden met de volumetoename van water naar ijs komen echter wel voor (Shuster, 2000). Bij AGF-projecten in slappe kleisoorten waar significante vorstheffing gemeten wordt, bedraagt de vries-dooi consolidatie meer dan de initieel gemeten vorstheffing (20-25 %).

2.12.3. UITVOERING

In de uitvoeringsfase van een AGF-project is een aantal tekortkomingen aan te wijzen dat geleid heeft tot problemen met stabiliteit en water. De oorzaken van deze uitvoeringsaspecten zijn in te delen in zes categorieën:

1. Vrieslansen

De penetratiediepte van de vrieslans is soms te weinig om het geplande vrieslichaam aan te leggen. De lengte en het aantal vrieslansen is dan tot een absoluut minimum teruggebracht om kosten te besparen. Het is ook mogelijk dat significante deviaties van de boorgaten zorgen voor afwijkingen van de vorm van het vrieslichaam.

De diameter van het geboorde gat voor de vrieslansen (de pipe spacing) moet afgestemd zijn op de diameter van de vrieslans. Een goede aansluiting van de vrieslans op het grondmassief zorgt voor een optimale warmteafvoer.

2. Vriescapaciteit

De capaciteit van de vriesinstallatie moet zijn afgestemd op de hoeveelheid warmte die aan het te bevriezen grondmassief onttrokken moet worden. Ook hier kunnen als gevolg van projectbezuinigingen fouten worden gemaakt doordat marginale of niet-geschikte apparatuur gebruikt wordt. De vriesmachine is het hart van het AGF-project en dient met grote zorgvuldigheid ontworpen en gekozen te worden.

3. Vriesduur en vroegtijdige ontgraving

Bezwijken van het grondmassief is voorgekomen door te vroege ontgraving. Aannemers met strakke plannings neigen naar een snelle ontgraving om een project geen verdere vertraging te laten oplopen. Oplossingen van calamiteiten, die door te vroege ontgraving veroorzaakt worden, zijn zeer kostbaar en technisch ingewikkeld.

4. Verlies van vriesvloeistof

Als gevolg van een foutief thermisch en mechanisch ontwerp van de vrieslansen kunnen grote problemen ontstaan door bezwijken van de vrieslansen. Het gevolg kan zijn dat er vriesvloeistof (pekkel of stikstof) het grondmassief in lekt waardoor de grondbevriezing ernstig bemoeilijkt of zelfs onmogelijk wordt. Het is ook mogelijk actieve koeling uit te voeren wanneer de warmteafvoer via constructies zeer hoog is (met name stalen constructies).

5. Isolatie

De aanvoer van warmte langs aanpalende (stalen) constructies kan leiden tot problemen met het gewenste temperatuurveld. Tijdige toepassing van actieve of passieve isolatie en het gebruik van de juiste constructiematerialen voor de tunnelsegmenten kunnen veel problemen voorkomen.

6. Geotechnische gegevens

De variatie in grondlagen en de daarmee samenhangende geohydrologie worden vaak onderschat bij het ontwerp. De variatie in zoutgehalte van het poriënwater kan in complexe geologische structuren zeer ingewikkeld zijn. Oppervlakkige evaluaties van het grondwater met te weinig meetgegevens en onvoldoende kennis van de geohydrologische situatie kunnen leiden tot onverwachte problemen bij de sluiting van het vrieslichaam.

2.13. ERVARINGEN MET GRONDBEVRIEZING

In deze paragraaf wordt een aantal artikelen besproken die handelen over projecten met kunstmatige grondbevriezing in het buitenland. Deze paragraaf is niet bedoeld als een literatuuroverzicht van buitenlandse AGF-ervaringen, maar geeft o.a. een goede indruk van de toepassing in de tunnelbouw.

1 - Gonze, P., Lejeune, M., Thimus, J.F., Monjoie, A. (1985) Sand ground freezing for the construction of a subway station in Brussels. In: Proc. 4th Int. Symp. on Ground Freezing, Sapporo, pp. 277-283

Inhoud

Dit artikel is het verslag van een haalbaarheidsstudie voor de toepassing van grondbevriezing voor het metrostation 'Louise' in Brussel. Het metrostation moest worden gebouwd onder een bestaand gebouw. Van belang was de minimalisatie van zakking en schade in het gebouw. Er werd gekozen voor de techniek van grondbevriezing om een tijdelijke fundering onder het gebouw te maken.

Doel

Het doel van de studie was het bepalen van de dikte en de stijfheid van het ijslichaam dat als fundering moest dienen. De dikte en de stijfheid van het ijslichaam hangen af van het watergehalte. Het einddoel van de studie was het bepalen van het ideale watergehalte voor de grond (een droog zand) onder het gebouw.

Aanpak en resultaten

In-situ metingen, numerieke modellen, laboratorium testen.

2 – Murray, M.J., Eskessen, S.D. (1997) Design and construction of cross passages at the Storebaelt Eastern railway tunnel. Proc. Tunneling 97, London, UK, pp. 463-479

Inhoud

Het artikel beschrijft de uitvoering van 29 dwarsverbindingen bij de Storebaelt Eastern spoortunnel. De tunnel moest worden gebouwd door een glaciële geul in de Storebaelt Formatie. Hierin komen lagen met spleten en voegen voor die een risico vormen voor de uitvoering van de dwarsverbindingen.

Doel

Het doel van dit artikel is de beschrijving van de projectuitvoering. Verschillende geotechnische voorbeelden worden gepresenteerd. Van belang is de beschrijving van de grondbevriezingstechniek voor de uitvoering van een aantal dwarsverbindingen in moeilijke grondcondities. In veel gevallen heeft de TBM zelf de grondcondities beschadigd.

3 – Autori varii, (1985) Artificial ground freezing in Belgium. In: Proc. ISSMG '85, San Francisco, Cal.

Inhoud

Het artikel beschrijft een aantal voorbeelden van werken in België, waarbij bevroering van grond is toegepast, zoals bij werkzaamheden aan de Metro in Antwerpen, de Metro in Brussel en aan de nieuwe gebouwen van de Algemene Spaar- en Lijfrentekas te Brussel. De overeenkomst tussen de Belgische en de Nederlandse grondcondities maakt dit artikel heel interessant.

Doel

Het doel van dit artikel is de beschrijving van de grondbevriezingsprojecten die in de laatste 20 jaar in België zijn uitgevoerd. Het artikel beschrijft ook de rekenmodellen die zijn gebruikt om de mate van grondbevriezing in de grond en het gedrag van de bevroren wand als functie van de tijd te bepalen.

4 – Arnold, D.C. (1985) Ground treatment for the three valleys tunnel. In: Tunnel and Tunneling, October 1985, pp. 35-38

Inhoud

Het artikel beschrijft de uitvoering van grondverbetering voor een kleine diameter tunnel (2,5 m) via twee verschillende technieken, namelijk grouting en grondbevriezingstechniek. De grondopbouw was lokaal verstoord als gevolg van de aanwezigheid van een zandlaag die in en op de London Clay formatie is afgezet. De zandlaag bevat water met overspanning. De uitvoering van de grouting lukte niet, waarna de techniek van grondbevriezing is uitgevoerd.

Doel

Het doel van het artikel is de beschrijving van de grondbevriezing uitgevoerd vanaf maaiveld.

Resultaten

Interessant zijn de resultaten van water-absorptietesten die hebben bepaald hoeveel injecties nodig zijn om de ondergrond ondoorlatend te maken.

De AGF-projecten die in Nederland zijn uitgevoerd zijn gebundeld in COB-rapport M 530-01 Grondbevriezen.

3. GEOMECHANISCHE EIGENSCHAPPEN VAN DE GROND

3.1. INLEIDING

In dit hoofdstuk worden de voor grondbevriezing relevante geologische, geomechanische en hydraulische parameters van de grondlagen bij dwarsverbinding-1 (DV1) en dwarsverbinding-2 (DV2) besproken. Deze inventarisatie is van belang voor de interpretatie van de metingen die zijn uitgevoerd voor F100. In dit hoofdstuk wordt tevens een inschatting gemaakt van de vorstgevoeligheid (voor vriesuitzetting) van de grondsoorten die bevroren worden bij DV1 en DV2.

Voor de bepaling van deze geomechanische karakteristieken worden zowel de gegevens van grondonderzoek uit 1994 en 1995 (WOV, 1995) gebruikt als de nieuwe F100-gegevens van testen aan grondmonsters uit de boringen SM-2/HE-4 en geofysische boorgatmetingen in de twee boorgaten SM-2 en HE-4. Het betreft hier bepalingen van korrelgrootte, watergehalte en volumiek gewicht, geochemische samenstelling, zoutgehalte en hydraulische doorlatendheid. De locaties van de nieuwe boringen – die gezet zijn ten behoeve van de plaatsing van de F100-meetinstrumenten – staan weergegeven in Figuur 6.2 en 6.4.

3.2. GRONDLAGEN BIJ DE DWARSVERBINDINGEN DV1 EN DV2

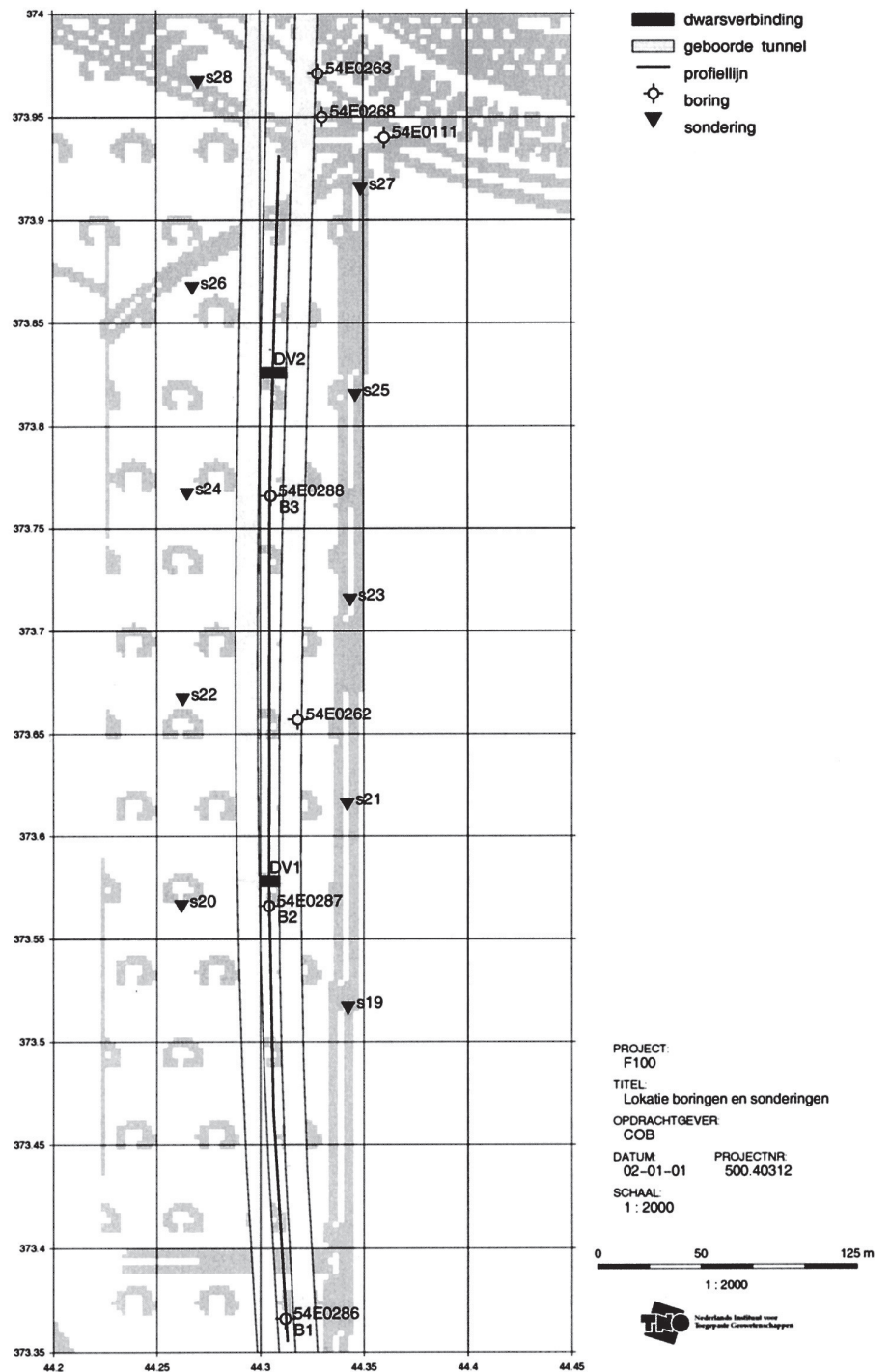
In dit hoofdstuk worden geotechnische eenheden beschreven die ter plaatse van DV1 en DV2 voorkomen. De sedimenten die een belangrijke rol spelen bij effecten van grondbevriezing bij DV1 en DV2 worden in deze paragraaf beschreven. Figuur 3.2 geeft een beeld van de variatie van de diepteligging van de onderscheiden geotechnische eenheden in het geboorde traject op de zuidoever van de Westerschelde. De vier voornoemde geotechnische eenheden behoren tot drie geologische formaties: de Formatie van Tongeren, de Formatie van Rupel en de Formatie van Naaldwijk.

Geotechnische eenheden

In dit rapport worden dezelfde coderingen gebruikt voor de geotechnische eenheden als in het grondonderzoek van WOV (1995). Bij DV1 en DV2 zijn de volgende eenheden van belang:

- | | | |
|----|--------------------------|-------------------|
| 1. | Laagpakket van Walcheren | Z1 |
| 2. | Laagpakket van Boom | BK1 en BK2 |
| 3. | Laagpakket van Zelzate | GZ2 |

Bij de aanleg van DV1 zijn de zandige afzettingen van het Laagpakket van Walcheren (Z1) bevroren. Bij DV2 zijn de kleiige afzettingen van Boom bevroren (BK1 en BK2).



Figuur 3.1 Kaart van de trajecten van de geboorde hoofdtunnels, de locatie van de dwarsverbindingen en de ligging van profiel A-A' op de zuidoever van de Westerschelde.

Figuur 3.1 toont het traject van de geboorde hoofdtunnels op de zuidoever van de Westerschelde en de positie van DV1 en DV2. In deze figuur staan tevens de locaties van de gebruikte (reeds bestaande) boringen en sonderingen aangegeven (GeoDelft, 1995a-b; WOV, 1995).

In Figuur 3.2 staan DV1 en DV2 schematisch in het profiel A-A' aangegeven. Het hart van DV1 ligt op een diepte van 17,5 m-NAP en is aangelegd in de Z1-laag.

Voor de grondbevriezing van DV1 zijn dan ook slechts zanden van de Z1-laag bevroren. DV2 ligt op een diepte van 28,7 m-NAP en is aangelegd in de Klei van Boom. Voor de grondbevriezing van DV2 zijn zowel de sedimenten van BK1 als BK2 bevroren. Het hart van DV2 ligt op de overgang van BK1 naar BK2.

De diepte van de top van de afzettingen van de Klei van Boom varieert sterk als gevolg van erosie. Het hart van DV2 ligt op een diepte van 28,7 m -NAP. Bij DV1 en DV2 ligt de top van de Klei van Boom tussen resp. 22 en 24 m -NAP (Figuur 3.2). De basis van de Klei van Boom is in de regio een regelmatig, licht naar het noorden hellend vlak. Rond DV1 en DV2 ligt de basis van de Klei van Boom op 38-40 m -NAP.

3.3. GEOLOGISCHE EN GEOTECHNISCHE EENHEDEN

3.3.1. FORMATIE VAN TONGEREN (OLIGOCEEN)

De zandige laag **GZ2** behoort tot de Laag van Ruisbroek en ligt onder het Laagpakket van Boom. De Laag van Ruisbroek behoort tot het Laagpakket van Zelzate (TNO-NITG, 2000).

Laagpakket van Zelzate; Laag van Ruisbroek

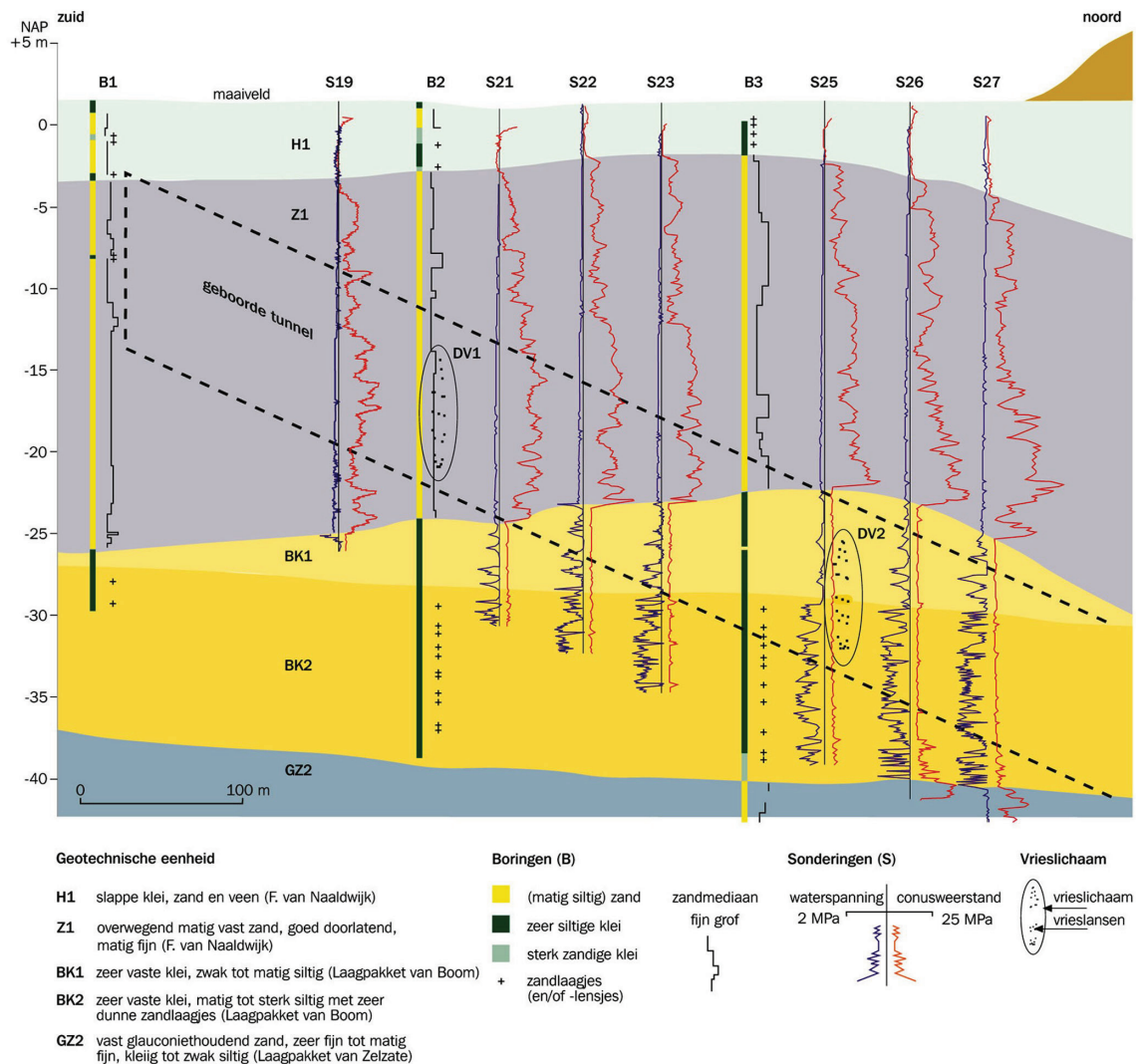
De oudste afzettingen worden gevormd door **GZ2**. Deze eenheid bestaat uit vast, glauconiethoudend zand, zeer fijn tot matig fijn, kleiig tot zwak siltig. De top van dit pakket op de zuidoever bevindt zich ter plaatse van de zuidoever op ca. 40 m -NAP. De diepte van de laagscheiding tussen GZ2 en BK2 is bepaald op basis van geologische criteria. De top van het Laagpakket van Zelzate (laagscheiding tussen GZ2 en BK2) is gelegd bij de bovenste zandlagen met grof zand.

3.3.2. FORMATIE VAN RUPEL (OLIGOCEEN)

Laagpakket van Boom

Op de zanden van Ruisbroek bevinden zich afzettingen van het Laagpakket van Boom (TNO-NITG, 2000). Binnen dit pakket worden twee eenheden onderscheiden BK1 en BK2.

BK2 bestaat uit zeer vaste klei, is matig tot sterk siltig met zeer dunne zandlaagjes en -lensjes, en is plaatselijk zwak tot matig siltig; plaatselijk met sterk siltige tot kleiige zandlagen. BK2 wordt naar de top fijner van korrelgrootte (Figuur 3.3) en gaat op ca. 40 m -NAP met een onregelmatig maar laag conform contact over in het laagpakket van Ruisbroek. De dikte van BK2 ter hoogte van DV1 is niet bepaald omdat boringen noch sonderingen de top van de onderliggende formatie bereiken. Bij DV2 bedraagt de dikte van BK2 8,4 m.



Figuur 3.2 Profiel A-A' met de diepteligging van de onderscheiden geotechnische eenheden Z1, BK1, BK2 en GZ2 op basis van geprojecteerde sonderingen en boringen. Voor locatie van profiellijn A-A' zie Figuur 3.1.

BK1 bestaat uit zeer vaste klei en is zwak tot matig siltig. De dikte van BK1 ter hoogte van DV1 bedraagt ca. 3,5 m. Bij DV2 bedraagt de dikte 6 m. Op de zuidoever van de Westerschelde bereikt slechts een zeer beperkt aantal boringen de top van BK2, waardoor nauwkeurige bepaling van de dikte van BK1 moeilijk is. Uit boringen die verder noordwaarts zijn gezet blijkt dat de dikte van BK1 en BK2 ook nog sterk variabel is (Figuur 3.10).

De laagscheiding tussen BK1 en BK2 is gedefinieerd op basis van de verschillen in waterspanning die gemeten zijn met elektrische sonderingen (Figuur 3.2 en Figuur 3.9). Hierbij geeft de variatie in verschillen van korrelgrootte en ongedraineerde schuifsterkte aanleiding tot definitie van de geotechnische eenheden BK1 en BK2 (Figuur 3.4 en Figuur 3.7). In par. 3.7 worden de oorzaken van de verschillen tussen BK1 en BK2 besproken.

3.3.3. FORMATIE VAN NAALDWIJK (HOLOCEEN)

Het zand boven de Klei van Boom bij DV1 en DV2 behoort tot de Formatie van Naaldwijk en wordt het Laagpakket van Walcheren genoemd. Het contact met de afzettingen van het laagpakket van Boom op 22,5 (bij DV2) en 24,0 (bij DV1) m-NAP is erosief.

Laagpakket van Walcheren; Laag van Gapinga (TNO-NITG, 2000)

De laag **Z1** bestaat uit overwegend matig vast zand, goed doorlatend, matig fijn van korrelgrootte (Figuur 3.3). In het grondonderzoek van WOV (1995) wordt deze eenheid beschreven als matig fijn tot matig grof. Het zand is zwak siltig en bevat lokaal schelpen (GeoDelft, 1995a; WOV-rapport CO-350690/378). Het zeezand is onder mariene omstandigheden afgezet. De dikte van laag **Z1** ter hoogte van DV1 bedraagt circa 22,5 m; bij DV2 bedraagt de dikte ca. 19 m.

De top van BK1 is tevens bepaald met behulp van boormonsters, geofysische boorgatmetingen en sonderingen (Figuur 3.6 en Figuur 3.9).

Het Laagpakket van Walcheren wordt op de zuidoever van de Westerscheldetunnel bedekt door een pakket slappe klei, zand en veen van de Formatie van Naaldwijk.

3.4. GEOMECHANISCHE LAAGEIGENSCHAPPEN

In deze paragraaf worden de voor F100 gemeten geomechanische eigenschappen beschreven.

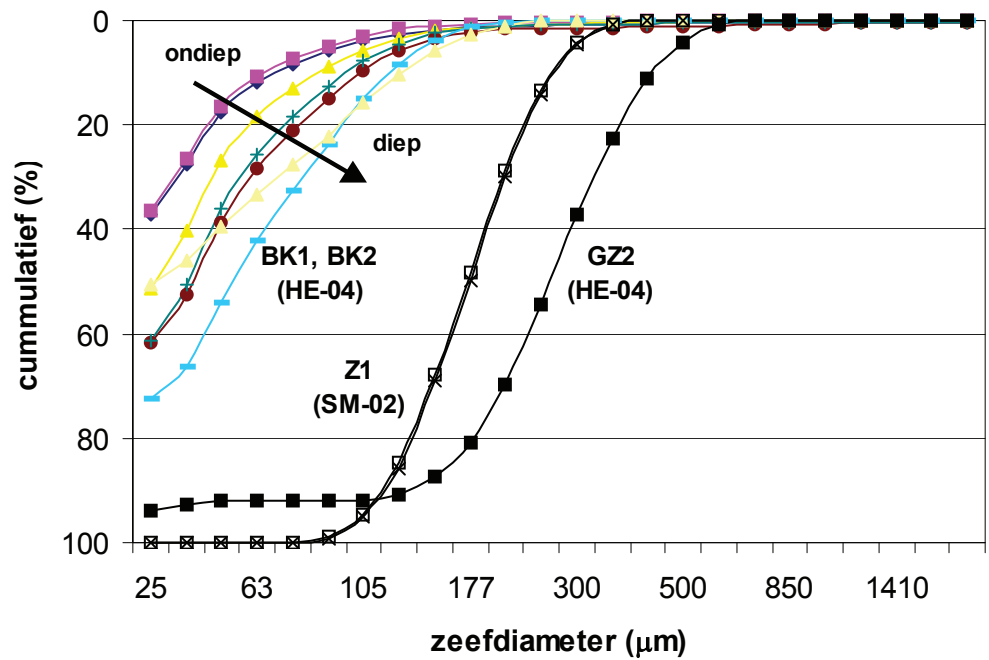
3.4.1. KORRELGROOTTE

Korrelgrootte-analyses zijn uitgevoerd op monsters afkomstig van de boringen SM-2 (bij dwarsverbinding 1) en HE-4 (bij dwarsverbinding 2). De locaties van deze boringen (die gezet zijn ten behoeve van de plaatsing van de F100-meetinstrumenten) staan weergegeven in Figuur 6.2 en 6.4.

De geotechnische eenheden Z1, BK1, BK2 en GZ2 worden gekarakteriseerd door sterk verschillende korrelgrootte-verdelingen (tabel 3.1 en Figuur 3.3). Uit Figuur 3.3 kan afgelezen worden dat de klei van BK1 in de top meer klei en silt bevat dan BK2. Het zand Z1 bij DV1 bevat geen klei en silt (zie ook tabel 3.1). De geotechnische eenheid GZ2 wordt gekarakteriseerd door een zandfractie, maar bevat eveneens silt (Tabel 3.1 en Figuur 3.3).

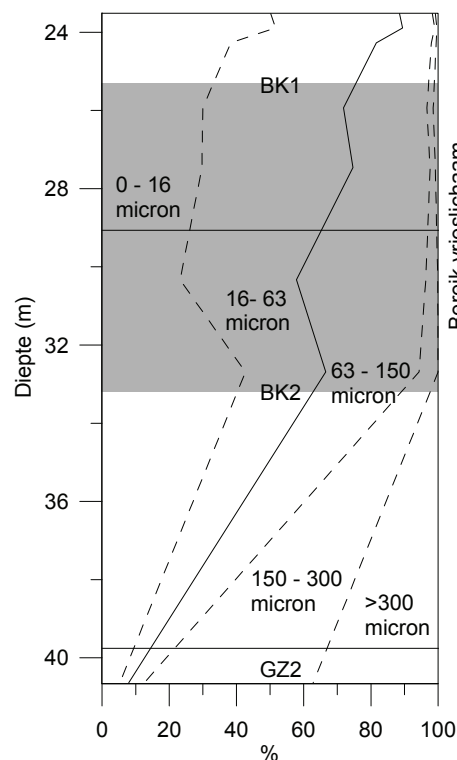
Tabel 3.1 Korrelfracties van de onderscheiden geotechnische eenheden.

geotechnische eenheid		< 63 µm in % (klei + silt fractie)	> 63 µm in % (zand fractie)
Z1	DV1	0	100
BK1	DV2	81,2	18,8
BK2	DV2	62,2	37,8
GZ2	DV2	7,9	92,1



Figuur 3.3 Resultaten van korrelgrootte-analyses van boormonsters van SM-02 (bij DV1) en HE-04 (bij DV2).

In Figuur 3.4 is de korrelgrootteverdeling in boormonsters van HE-04 versus de diepte (m-maaiveld) geplot. Het globale dieptebereik van de bevroren grond van DV2 is in grijs tint in Figuur 3.4 aangegeven. Hieruit kan worden afgelezen dat het gehalte aan klei en silt in boring HE-04 met toenemende diepte afneemt van >80 % naar ca. 65 % in het bereik van het vrieslichaam, terwijl het gehalte fijn zand (63-150 μm) toeneemt. Deze trend loopt vrij geleidelijk. De eenheid GZ2 is zandiger, maar de lithologie blijft fijn zand (<300 μm).



Figuur 3.4 Verloop van de korrelgrootte-verdeling in boring HE-04 bij DV2 (μm = micrometer).

3.4.2. WATERGEHALTE, DICHTHEID EN POROSITEIT

Om de vier geotechnische eenheden kwantitatief te kunnen karakteriseren zijn het watergehalte, volumiek gewicht, dichtheid en porositeit met laboratorium- en boorgatmetingen bepaald. De resultaten worden hieronder weergegeven. De gegevens zijn aangevuld met gegevens van WOV (1995).

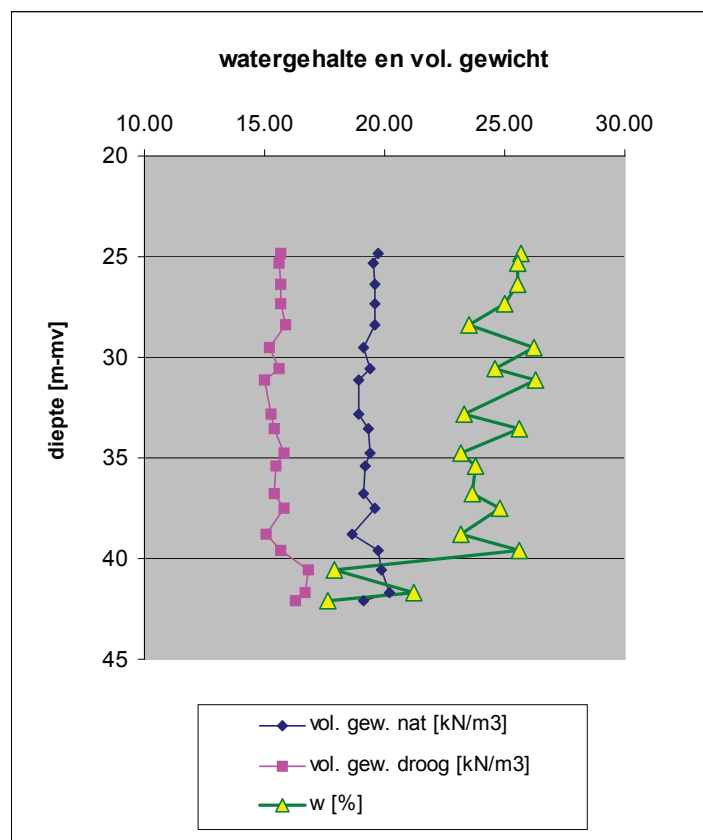
WATERGEHALTE EN VOLUMIEK GEWICHT

Uit monsters van boring HE-o4 is het watergehalte w en het natuurlijke volumiek gewicht γ_{nat} bepaald van de volgende geotechnische eenheden (Tabel 3.2 en Figuur 3.5).

Tabel 3.2 Watergehalte en nat volumiek gewicht

eenheid	aantal metingen	watergehalte (gewicht) %	γ_{nat} kN/m ³
Z1	-	22 ¹	
BK1	8	25,3	19,4
BK2	9	23,8	19,3
GZ2	2	19,4	19,7

noot ¹ : Het natuurlijk (in-situ) watergehalte van **Z1** is geschat op ca. 22 % op basis van porositeitsgegevens (zie Figuur 3.6).



Figuur 3.5 Watergehalte w en volumetrisch gewicht van grondmonsters uit de boring HE-o4 bij DV2.

DICHTHEID

De dichtheid ρ is met twee geofysische boorgatmetingen opgenomen in de boorgaten SM-03 en SM-04. Geofysische boorgatmetingen zijn tevens verricht om de exacte top van het Laagpakket van Boom bij DV2 te vinden. De top van de Klei van Boom bij DV2 is zodanig vastgelegd op 24,0 m-mv (Figuur 3.6).

De dichtheid ρ is opgenomen als continue geofysische opname (DEN-CDL) in boorgat SM-04 (Tabel 3.3). Daarna is het natte volumiek gewicht is berekend.

Tabel 3.3 Volumiek gewicht bepaald met geofysische boorgatmeting

eenheid	nat volumieke gewicht γ_{nat} kN/m ³
Z1	18
BK1	19

POROSITEIT

De porositeit P is bepaald van Z1 en BK2 in het boorgat SM-04. De resultaten van de veldmetingen staan weergegeven in Figuur 3.6. Met deze geofysische opname kunnen de zandlagen met hoog poriëngetal opgespoord worden. De conclusie van deze opname is dat de BK1 geen goed waterdoorlatende zandlagen bevat in het gemeten traject.

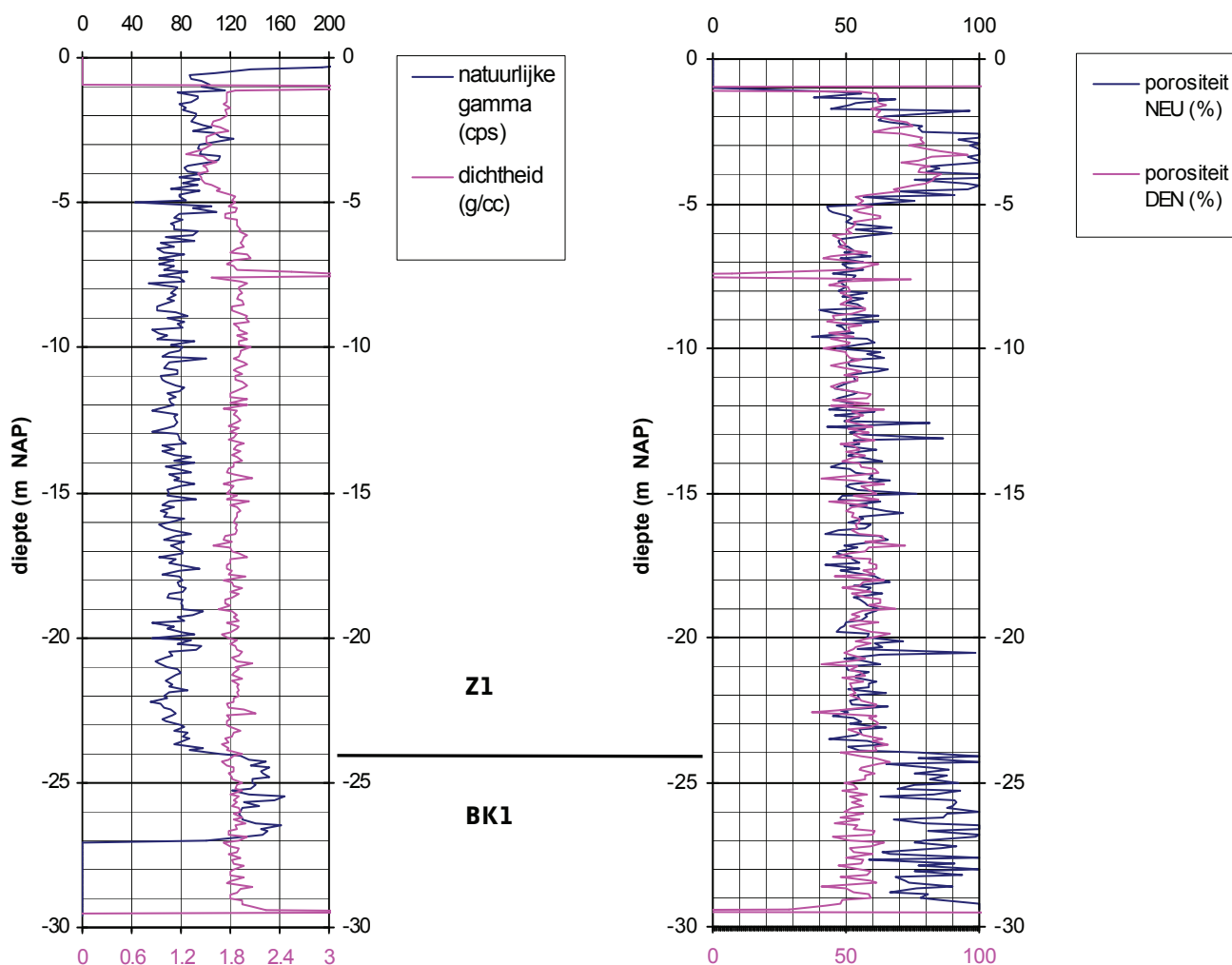
De porositeit POR-DEN is berekend op basis van een bulkdichtheid van water van 1 g/cc. Het geofysische boorgatapparaat POR-DEN meet de elektronendichtheid van lagen.

Deze meting is waarschijnlijk beïnvloed door (gedeeltelijke) uitspoeling van het boorgat. Hierdoor wordt in plaats van het sediment boorvloeistof gemeten, of een mengsel van sediment en boorvloeistof. Ook is het mogelijk dat de afstand tussen het meetapparaat en de wand van het boorgat te groot is, of dat de casing van het boorgat de meting heeft beïnvloed.

De porositeit van Z1 bedraagt gemiddeld 52-54 % en van BK1 49-51 % (tabel 3.4). De porositeit POR-NEU komt in de zandige lagen overeen met POR-DEN (Figuur 3.6), maar kan niet echter worden gebruikt voor absolute bepaling van de porositeit van het laagpakket van Boom. De laagscheiding tussen Z1 en BK1 is goed te zien in de opname van figuur 3.6.

Tabel 3.4 Berekende porositeit op basis van POR-DEN boorgatmetingen.

eenheid	porositeit P (volume) %
Z1	52-54
BK1	49-51



Figuur 3.6 Geofysische boorgatmetingen in boorgat SM-04: (1) natuurlijke gamma straling, (2) dichtheidslog, (3) berekende porositeit op basis van neutronlog (NEU) en (4) berekende porositeit op basis van dichtheid (DEN).

3.5. DOORLATENDHEID

De doorlatendheid speelt een belangrijke rol bij de vriesgevoeligheid en vorstuitzetting van een grondsoort.

De doorlatendheden die bepaald zijn van de grondsoorten bij DV₁ en DV₂ worden weergegeven in Tabel 3.5 (WOV, 1995). Van het sterk gelaagde pakket van Boom is in het laboratorium in monsters van HE-04 zowel horizontale als verticale doorlatendheid gemeten. Bij gebruik van gegevens over doorlatendheid moet er wel rekening mee worden gehouden dat de gemeten doorlatendheid de werkelijke doorlatendheid onderschat, omdat de zandige lagen in het laagpakket van Boom niet zijn gemeten in het laboratorium (maar wel in het veld aanwezig zijn).

Tabel 3.5 Doorlatendheden ter plaatse van de zuidoever van de Westerscheldetunnel (WOV 1995).

eenheid	k_v m/s	diepte m –mv	boring
Z1	$1,3 - 1,9 \times 10^{-4}$	13,2	B33
BK1	$0,23 \times 10^{-9}$	25,0	B3
BK2	$0,17 \times 10^{-9}$	36,6	B6
GZ2	$0,4 - 0,64 \times 10^{-4}$	50,1	B6

Het verschil tussen verticale en horizontale doorlatendheid is een maat voor de gelaagdheid van klei. De horizontale doorlatendheid is gemeten evenwijdig aan de gelaagdheid van de klei, terwijl de verticale doorlatendheid loodrecht op de gelaagdheid van de klei is gemeten. Hiervoor zijn kleimonsters van boring HE-04 (29 m-mv) gebruikt. De horizontale doorlatendheid is een factor 12 tot 39 maal zo groot als de verticale doorlatendheid Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Resultaten van doorlatendheidsmetingen BK1 (monsters van diepte 29 m-mv).

monster nr.	k_v m/s	k_h m/s	k_h/k_v -
HE-04 09	2,36 E-11	-	-
HE-04 12	2,23 E-11	2,65E-10	12
HE-04 13	1,48 E-09	5,83E-08	39
HE-04 15	2,6 1E-09	-	-

3.6. ATTERBERGSE GRENZEN

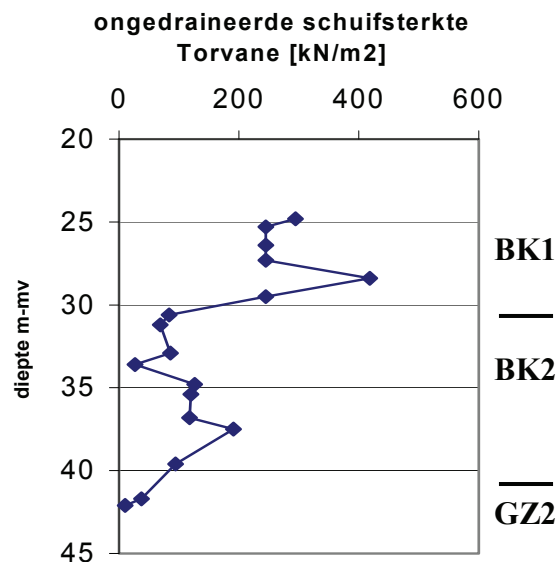
In boring Bo6 van het grondonderzoek van WOV (1995) worden de Atterbergse grenzen gerapporteerd (Tabel 3.7). Deze waarden zijn afkomstig van twee monsters op een diepte van 30,45 en 39,95 m –NAP. Boring o6 staat in de Pas van Terneuzen op meer dan 1 km van de DV2 en de resultaten van deze testen op monsters uit deze boring en kunnen slechts als indicatie worden gebruikt in dit onderzoek.

Tabel 3.7 Atterbergse grenzen van BK1 en BK2 (WOV, 1995)

	diepte m-NAP	Wp %	Wl %	Ip -
BK1	30,45	30	91	61
BK2	39,95	25	76	51

3.7. ONGEDRAINEERDE SCHUIFSTERKTE

Van grondmonsters van HE-o4 is met een Torvane de ongedraineerde schuifsterkte gemeten om de consistentie van het kleiig materiaal in deze boring (BK1 en BK2) te bepalen. Figuur 3.7 geeft de resultaten van deze metingen weer. Het laagpakket van Boom bij DV2 neemt naar de basis af in sterkte. De ongedraineerde schuifsterkte neemt af van ca. 220 kN/m² naar ca. 100 kN/m². De zeer lage waarden op een diepte van ca. 34 m-mv en 42 m-mv hangen samen met het voorkomen van zandige lagen (BK2 en GZ2).



Figuur 3.7 Resultaten van schuifsterkte metingen in BK1, BK2 en GZ2 bij dwarsverbinding DV2.

3.8. GRONDWATER EN ZOUTGEHALTE

3.8.1. ZOUTGEHALTE VAN GRONDLAGEN BIJ DE ZUIDELIJKE TOERIT

Om het zoutgehalte van het grondwater en de grondlagen bij de dwarsverbindingen van de Westerscheldetunnel te onderzoeken is gebruik gemaakt van het DINO Grondwaterarchief (TNO-NITG) en van laboratoriumanalyses van monsters van boring HE-o4 bij DV2.

Metingen bij DV1 en DV2 (SM-o2 en HE-o4)

Het zoutgehalte dicht bij de dwarsverbindingen is bepaald in twee boringen (HE-o4 en SM-o2).

In boring HE-o4 (DV1) loopt het zoutgehalte terug van 12589 mg Cl⁻/l in het bovenste monster van de klei van Boom tot 271 mg Cl⁻/l aan de basis (Figuur 3.8). Het verloop is hyperbolisch, volgens een normaal diffusieprofiel.

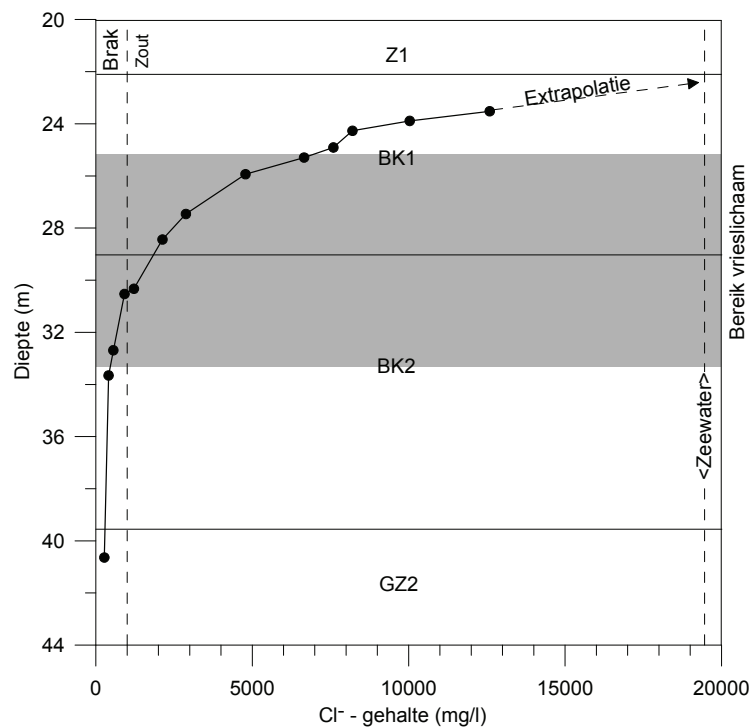
Op basis van extrapolatie van het Cl-gehalte mag verwacht worden dat in de top van BK1 zeewater aanwezig is. Hoewel het zoutgehalte met de diepte afneemt en rond 30 m diepte overgaat van zout naar brak, is het nog steeds niet zoet in GZ2.

In boring SM-02 (DV2) zijn twee monsters uit eenheid Z1 in het gebied van het vrieslichaam geanalyseerd op zoutgehalte. Op basis van een geschat watergehalte van 22% (het gemiddelde voor eenheid Z1) liggen de waarden daar op 6655 (op 14,76 m), resp. 3410 mg Cl⁻/l (op 17,53 m diepte), dus nog steeds in het zoute gebied.

DINO-Grondwater

Het zoutgehalte in de put 54EP0228(-01) bedraagt 10.265 tot 11.550 mg Cl⁻/l op een diepte van 18,8 tot 19,2 m-mv (metingen 1990-1996). Deze metingen zijn uitgevoerd in de ondiepe zandige afzettingen Z1. Het zoutgehalte is ongeveer de helft van dat van zout zeewater. Deze put staat op ca. 1 km ten zuiden van DV2.

Het zoutgehalte in de put 54EP0269(-01) bedraagt 16.150 tot 16.978 mg Cl⁻/l op een diepte van 22,0-24,0 m-mv (metingen 1990-1996). Deze metingen zijn eveneens uitgevoerd in de zandige afzettingen van de aquifer Z1. Het zoutgehalte benadert de waarde van het zoute zeewater in de Westerschelde. Deze put staat op ca. 200 m ten noordwesten van DV1, op de dijk van de Westerschelde. Op grotere diepte van 48,0-50,0 m-mv bedraagt het zoutgehalte 285 tot 312 mg Cl⁻/l (metingen 1994-1997). Deze metingen zijn uitgevoerd in de zandige laag van Ruisbroek, direct onder het laagpakket van Boom. Het water in deze aquifer is zoet. Op grotere dieptes van 80 m-mv blijft het zoutgehalte laag: 290 mg Cl⁻/l.



Figuur 3.8 Verloop van het zoutgehalte met de diepte in boring HE-04. De normale waarde voor zeewater, en de grens zout - brak zijn aangegeven.. Het verloop van Cl⁻ is handmatig geëxtrapolleerd naar de top van BK1. De Cl⁻-waarden bereiken daar het niveau van zeewater.

Tabel 3.8 Zoutgehalten van geotechnische eenheden

eenheid	zoutgehalte Cl ⁻ (mg/l)	karakterisering
bij DV1: Z1	~ 3400 tot 6600	~ zout
bij DV2: BK1	~ 2000 tot 13.000	~ zout
BK2	< 1000	~ brak
GZ2	< 1000	~ brak

3.8.2. GRONDWATERSTROMINGEN

De groei van een vrieslichaam kan sterk beïnvloed worden door waterstromingen zoals getijden. De invloed van het getijde op de waterspanningen bleek op de zuidoever van de Westerschelde in de Willemskerkhofpolder zeer laag te zijn (WOV, 1995). Ook de invloed van het getijde is als verwaarloosbaar aangemerkt voor alle in dit rapport beschouwde eenheden **Z1**, **BK1**, **BK2** en **GZ2**. Significant natuurlijke grondwaterstroming is bij DV1 en DV2 niet voorzien (WOV, 1995).

3.9. GRONDSPANNINGEN EN WATERSPANNING

Om de gegevens van de monitoring van grondspanningen en waterspanning bij DV1 en DV2 goed te kunnen interpreteren worden deze waarden in deze paragraaf gegeven uit de periode voor de grondbevriezingsactiviteiten Tabel 3.9 geeft de waarden van korrelspanningen en waterspanning die zijn gemeten bij DV1 en DV2. De korrelspanningen en hydrostatische waterspanningen zijn gebaseerd op de volumieke gewichten van WOV (1995).

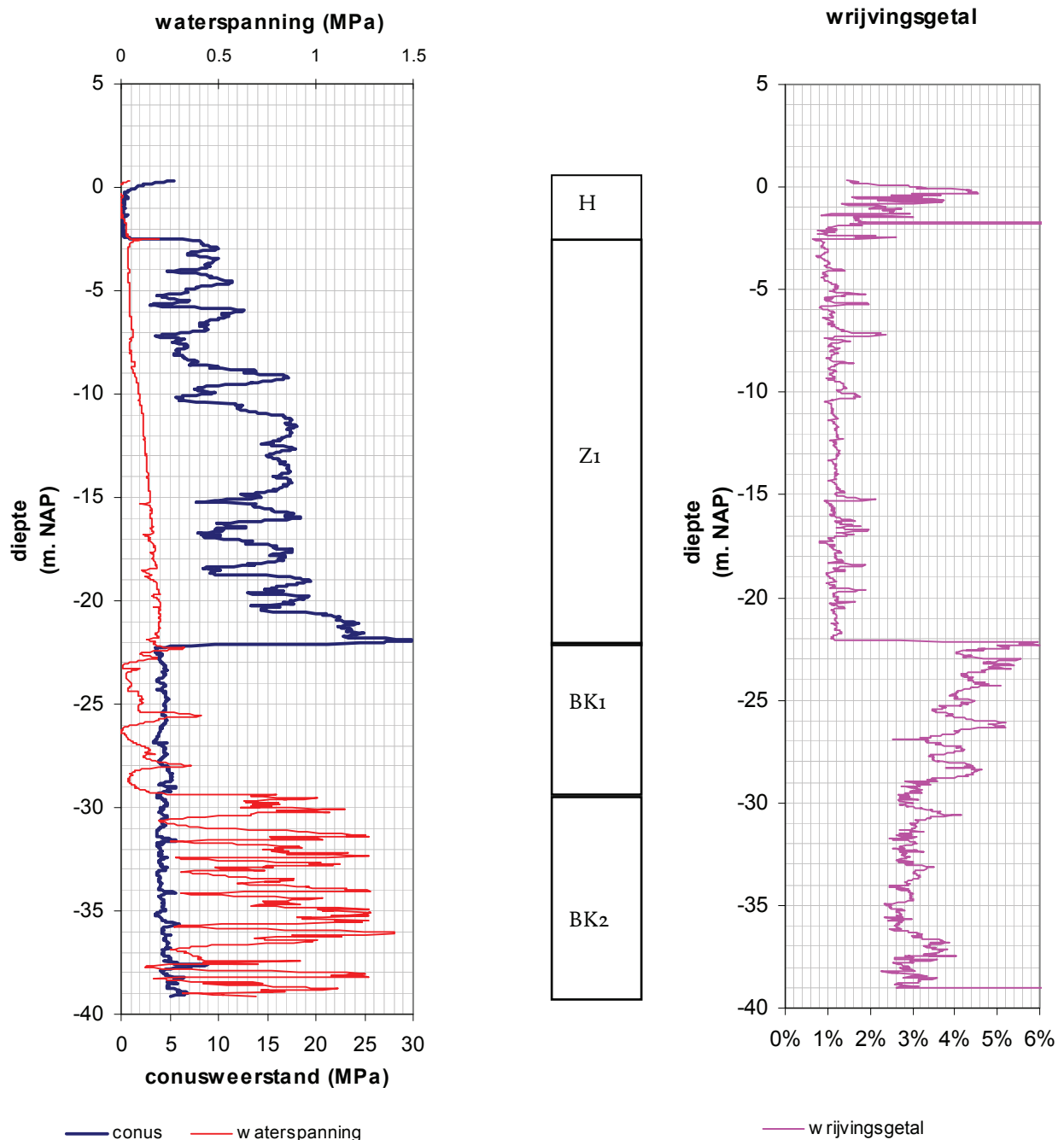
De in sonderingen gemeten waterspanningen in BK1 vertonen wel andere waarden dan die in BK2. Op sommige dieptes wordt in BK1 zelfs een negatieve waterspanning gemeten. Deze negatieve waterspanning wordt verklaard door het ontstaan van scheuren in de relatief stijve klei van BK1 gedurende de penetratie van de CPT-conus. Het wrijvingsgetal in de sondering S24 (Figuur 3.9) is relatief laag, wat impliceert dat de klei met grotere diepte siltiger wordt. BK2 bevat ook meer zandlaagjes en –lensjes dan BK1. De waterspanningen in BK2 zijn hoger dan die in BK1: 0,3 – 1,4 MPa versus 0 – 0,2 MPa (Figuur 3.9). Dit is het gevolg van betere drainage in zandlaagjes.

DV1

De dichtstbijzijnde sonderingen zijn S19, S20 en S21. De dwarsverbinding DV1 ligt tussen 14,4 en 20,8 m–NAP (bovenste en onderste vrieslans). De lithologie bestaat uit doorlatend zand bij DV1. De hydrostatische waterspanning zou theoretisch ca. 160 kPa bedragen. De gemiddelde gemeten waterspanning bedraagt voor de drie sonderingen (op de aangegeven diepte van DV1) ca. 165 kPa (figuur 3.9) en is dus goed vergelijkbaar met de hydrostatische waterspanning.

DV2

De dichtstbijzijnde sonderingen zijn S24, S25 en S26. De dwarsverbinding DV2 ligt tussen 25,5 en 32,0 m –NAP (bovenste en onderste vrieslans). De lithologie bestaat uit ondoorlatende klei bij DV2. De waterspanning die geregistreerd is in stijve klei door sonderingen is niet een werkelijke in-situ waterspanning. De (dynamische) hydrostatische waterspanning (met de sondering gemeten) ligt tussen -40 en 1340 kPa in het traject van DV2 (tabel 3.9). De oorzaak van dit grote verschil is het ontstaan van scheuren in de stijve klei bij de sondeerconus, waardoor er in de ontstane holtes een negatieve waterspanningen heerst (vacuüm).



Figuur 3.9 Sondering S24 met geotechnische interpretatie en gemeten water-spanningen met interpretatie van geotechnische eenheden (H = Holoceen).

Tabel 3.9 In-situ en waterspanningen bij DV1 en DV2.

	korrel- spanning kN/m ²	geschatte waterdruk (hydrostatisch) kN/m ²	grondspanning kN/m ²	gemeten waterdruk (sondering) kN/m ²
Dwarsverbinding 1 Diepte van hart DV1 ligt op 17,5 m-NAP	170	160	330	162 tot 167
Dwarsverbinding 2 Diepte van hart DV2 ligt op 28,7 m-NAP	310	290	600	(-40 tot 1340)

3.10. VORSTGEVOELIGHEID

De vorstgevoeligheid van de grondsoorten die bevroren worden bij DV1 en DV2 kan worden geclassificeerd volgens de systematiek van de ISSMFE (1989). Op basis van grondsoort en plasticiteit worden BK1 en BK2 als gemiddeld tot sterk gevoelig voor vorstheffing geclassificeerd (Tabel 3.10).

Tabel 3.10 Classificatie van de vorstgevoeligheid van de grondsoorten bij DV1 en DV2.

eenheid	grondsoort	plasticiteit limiet WL [%]	SPo [mm ² /h.K]	vorstgevoeligheid ISSMFE (1989)
Z1	goed gegradeerd zand – SW	-	< 0,5	verwaarloosbaar
BK1	niet-organische siltige klei – CL (met enkele dunne zandlaagjes)	24,7	1,5 - 3,0	matig – sterk
BK2	niet-organische sterk siltige klei – CL met dunne zandlaagjes	21,8	1,5 - 3,0	matig – sterk
GZ2	slecht gegradeerd zand – SP	-	< 0,5	verwaarloosbaar

SW = goed gegradeerd zand

CL = weinig tot matig plastische klei niet-organische klei, siltig klei, zandige klei en grindige klei.

SP = slecht gegradeerd zand en grindhoudend zand (weinig tot geen fijne deeltjes)

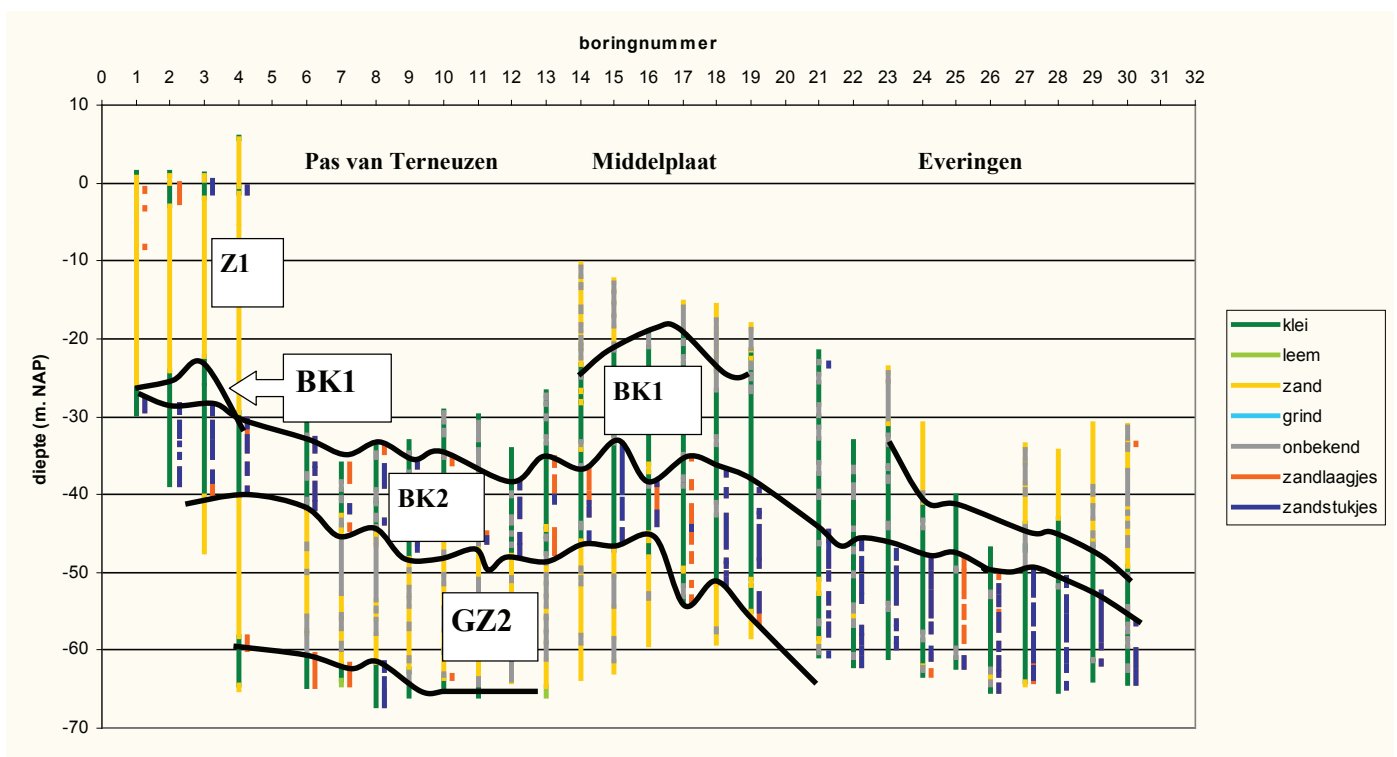
3.11. ZANDLAGEN EN ZOUTGEHALTE ONDER DE WESTERSCHELDE

In het overige traject van de Westerscheldetunnel verder naar Zuid-Beveland worden nog meer dwarsverbindingen aangelegd met behulp van grondbevriezing. In deze paragraaf worden daarom hier de twee belangrijkste parameters voor grondbevriezing in het Westerscheldetunnel boortraject besproken: de lithologische ontwikkeling (grondsoorten) en het zoutgehalte.

3.11.1. ZANDLAGEN IN HET PROFIEL VAN DE WESTERSCHELDETUNNEL

In Figuur 3.10 is een schematisch profiel tussen NAP -20 m en -70 m, gebaseerd op boringen, weergegeven. De laagpakketten van Boom (BK1 en BK2) zijn te vervolgen naar het noorden. Het deel waar de zandlaagjes en – lenzen voorkomen is BK2. Het zand boven BK1-BK2 is Z1; eronder liggen de zanden van GZ2.

In het schematisch profiel van figuur 3.10 is te zien dat er met name onder de Middelplaat in de eenheid BK2 veel zandige lagen en inschakelingen voorkomen. Wanneer deze zandlagen een significante dikte bereiken (meer dan 0,5 m) en tevens in de kern van het vrieslichaam gesitueerd zijn, kunnen deze grondsoorten problemen veroorzaken. Dit kan worden voorkomen door drainagepijpen aan te brengen.



Figuur 3.10 Schematisch profiel van de Klei van Boom op basis van boringen met hoofdlithologie en voorkomen van zandlaagjes en – lensjes. DV1 en DV2 liggen tussen de boringen 2 en 4.

3.11.2. ZOUTGEHALTE VAN GRONDLAGEN ONDER DE WESTERSCHDELDE

Zoutgehalte

In de Westerschelde is in drie boringen (48G160, 48G158 en 54E268) het zoutgehalte van het poriënwater van het laagpakket van Boom bepaald (TNO-NITG, 1998). Hieruit bleek dat in het bovenste deel van de Klei van Boom (in bovenste twee monsters van iedere boring) het zoutgehalte van het poriënwater ongeveer 20.000 mg Cl⁻/l bedraagt.

Vanaf de bovenkant van het laagpakket van Boom neemt het zoutgehalte exponentieel af tot vrijwel nul over een afstand variërend tussen 10 en 12 m. In twee van de drie boringen is aan de basis van het laagpakket van Boom een laag zoutgehalte in het poriënwater geconstateerd.

In boring 48G160 wordt, in tegenstelling tot de twee andere boringen, over het traject 42-46 m -NAP zout in het poriënwater aangetroffen. Het diepste monster in deze boring, genomen uit het Laagpakket van Zelzate, bevat weer zout. Dit is ook waargenomen in een filter op de Middelpaas onder het laagpakket van Boom.

Tevens blijkt dat het grondwater in dit filter het getijdenverloop van de Westerschelde volgt (RGD, 1992; TNO-NITG, 1998). Dit betekent dat er door de afwezigheid van het laagpakket van Boom in het diepste deel van de geul van de Westerschelde (Pas van Terneuzen) een hydraulisch contact bestaat tussen het zandige Laagpakket van Zelzate en de geul van de Westerschelde.

3.12. SAMENVATTING

In Tabel 3.11 staan de eigenschappen, die relevant zijn voor kunstmatige bevrozing van de grondlagen bij DV1 en DV2 samengevat. Deze karakterisering vormt een belangrijke basis voor de geotechnische analyse van de F100-monitoring meetgegevens.

Eenheid Z1 bij DV1 is een zandlaag met goed drainerende eigenschappen. Deze laag heeft een relatief laag zoutgehalte en de grondsoort is niet vorstgevoelig. De eenheden BK1 en BK2 bij DV2 zijn wel vorstgevoelig vanwege de lage doorlatendheid en kleinere korrelgrootten.

BK1 en BK2 hebben een onderling verschillende conusweerstand en ongedraineerde schuifsterkte. Ook het watergehalte en het zoutgehalte van het poriënwater van BK1 zijn substantieel hoger dan dat van BK2. Bij DV1 en DV2 zullen bij grondbevrozing sterke verschillen in vorstheffing optreden als gevolg van de verschillende grondslag.

Tabel 3.11 Samenvatting van grondeigenschappen van onbevroren grondsoorten bij DV1 en DV2. De gegevens in de grijze banden zijn afkomstig van WOV (1995).

grondeigenschappen	eenheid	Z1	BK1	BK2	GZ2
lithologie	NEN 5104	fijn zand	siltige klei	siltige klei met zandlaagjes	siltig fijn zand
kleifractie (gemiddeld)	%	0	81,2	62,2	7,9
zandfractie (gemiddeld)	%	100	18,8	37,8	92,1
watergehalte	%	22	25,3	23,8	19,4
γ nat	kNm ³	-	19,4	19,3	19,7
γ droog	kN/m ³	15,5			
porositeit p	%		~ 50	~ 50	~ 47
k_v	m/s	1,3E-4 - 1,9E-4	1,5E-9 - 2,4E-11	-0,17 x 10E-9	0,4E-4 - 0,6E-4
k_h	m/s		2,7E-10 - 5,8E-8	-	
k_v/k_h	-		~ 30	-	
W_p plasticiteitsgrens	%		30	25	
W_L vloeigrens	%		91	76	
I_p plasticiteits-index	-		61	51	
schuifst. torvane	kN/m ²		~ 220	~ 100	
zoutgehalte	Cl ⁻ mg/l	3400-6600	2000-13000	< 1000	< 1000
conusweerstand	MPa	17 (hart DV1)	4 (hart DV2)		
wrijvingsgetal	-	1 - 1,2 (hart DV1)	4 - 5,4 (hart DV2)		
korrelspanning	kPa	170 (hart DV1)	310 (hart DV2)		
waterdruk	kPa	150 (hart DV1)	290 (hart DV2)		
hydrostatisch	-				
vorstgevoeligheid ISSMFE (1989)	-	verwaarloosbaar	matig-sterk	matig-sterk	verwaarloosbaar

4. LABORATORIUMONDERZOEK BEVROREN GROND

Laboratoriumexperimenten met bevroren grond ten behoeve van de aanleg van de dwarsverbindingen zijn uitgevoerd door Jessberger (1998) in opdracht van Philipp Holzman en TNO-NITG (2000) in opdracht van de Bouwdienst Rijkswaterstaat (3D-uitzettingsgedrag). De resultaten van deze twee verschillende typen onderzoek worden in dit hoofdstuk samengevat.

4.1. GEOTECHNISCHE ONTWERPPARAMETERS BEVROREN GROND (KMW)

Ten behoeve van de aanleg van de dwarsverbindingen met grondbevriezing heeft het Ingenieursbureau Westerscheldetunnel (Philipp Holzmann AG – Ways & Freytag AG) laboratoriumonderzoek laten uitvoeren om rekenwaarden van geotechnische ontwerpparameters van bevroren grondtypen uit het profiel van de Westerscheldetunnel vast te leggen (Jessberger, 1998). Dit onderzoek heeft voornamelijk betrekking op de BK1, BK2 en GZ2 eenheid (Laagpakket van Boom; Jessberger, 1998). De grondmonsters die in dit onderzoekprogramma gebruikt zijn, komen uit het gehele tunneltraject van de Westerscheldetunnel. De in-situ diepte van de testmonsters varieert van 20 tot 60 m onder NAP.

De proeven die zijn uitgevoerd op bevroren klei van de BK1, BK2 en GZ2 eenheid betreffen:

Uni-axiale druksterkte ($T = -5, -10$ en -20 °C) par. 4.1.1

Uni-axiaal kruipgedrag ($T = -10$ °C) par. 4.1.2

Triaxiale sterkte ($T = -10$ °C) par. 4.1.3

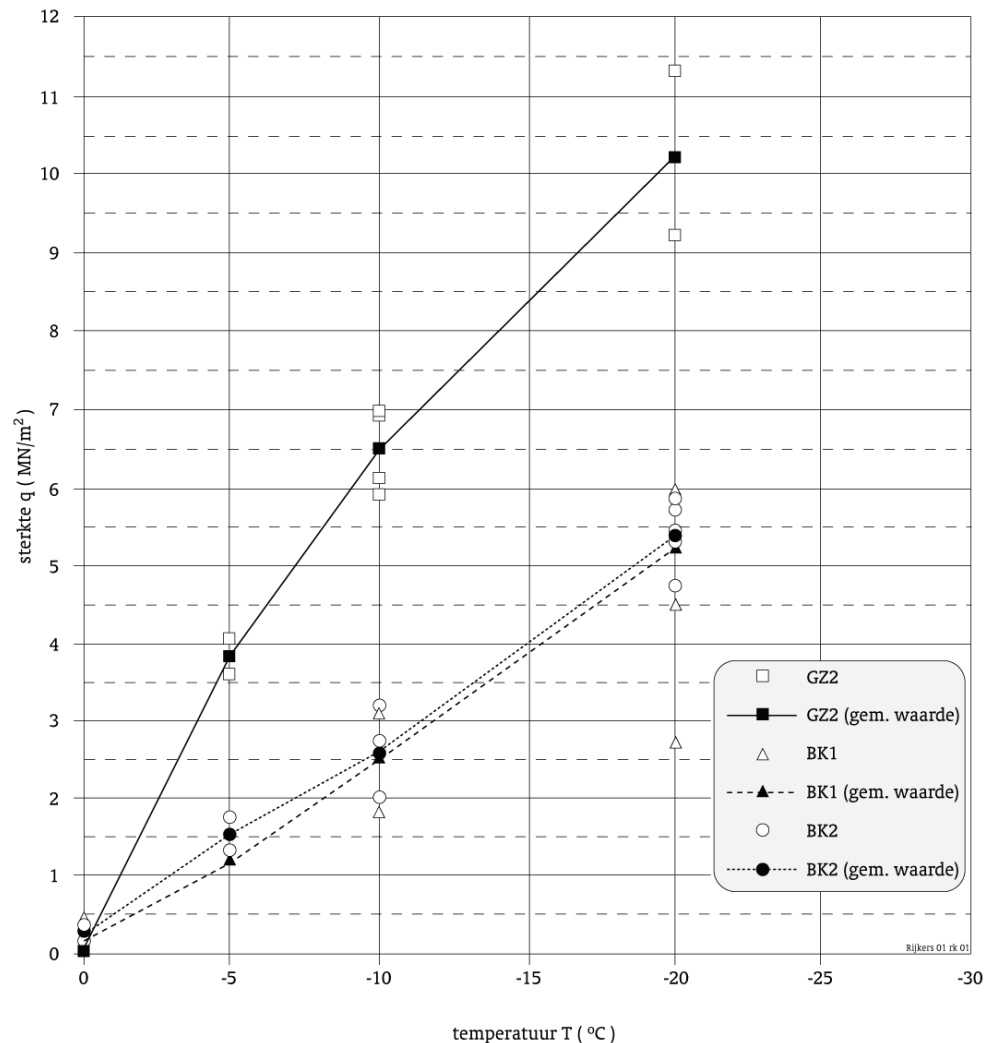
Vorstheffing par. 4.1.4

Bij alle testen is gestreefd naar een waterverzadigingsgraad $S_r = 1$. Bij lagere verzadigingsgraad dan 1 is vastgesteld dat de invloed hiervan klein was (Jessberger, 1998). Alle proeven zijn uitgevoerd volgens de aanbevelingen van ISGF (1987).

Hiernaast zijn druk- en triaxiaalproeven uitgevoerd om de mogelijke verandering van de stijfheid van de klei na ontdooiing te meten. Op basis van deze proeven zijn rekenparameters voor bevroren grond vastgesteld.

4.1.1. UNI-AXIALE DRUKSTERKTE ($T = -5, -10$ EN -20°C)

Uni-axiale druksterkteproeven (zonder steundruk, ‘unconfined compressive strength’) zijn uitgevoerd met kleimonsters van BK1, BK2 en GZ2. De proeven zijn uitgevoerd met monsters met een zoutgehalte van 0 Cl⁻ mg/l en 8000 Cl⁻ mg/l. De uni-axiale sterkte q is een functie van de temperatuur en vertoont een kleine spreiding per grondsoort (figuur 4.1).



Figuur 4.1 Uni-axiale druksterkte als functie van de temperatuur voor BK1, BK2 en GZ2.

4.1.2. ÉÉN-AXIAAL KRUIPGEDRAG ($T = -10^{\circ}\text{C}$)

De stijfheid van bevroren grond hangt sterk af van de deformatiesnelheid en de duur van de belasting. Dat betekent dat de vervormingen van een bevroren monster onder een constante belasting afhankelijk worden van de aangebrachte spanning. Voor de bepaling van kruipgedrag van BK1, BK2 en GZ2 zijn ongestoorde monsters onder een temperatuur van -10°C onder uni-axiale spanning getest. De kruiptesten hebben maximaal 100 uur geduurd.

De resulterende meetcurve hangt af van de belasting, de duur, de temperatuur, verticale spanning, dichtheid, water- en ijsgehalte (lees: onbevoren watergehalte). De kruipparameters A, B en C zijn in BK1, BK2, en GZ2 bepaald (Tabel 4.1 en par. 2.9).

Tabel 4.1 Kruipparameters A, B en C bij $T = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ van BK1, BK2 en GZ2 (volgens KMW en Jessberger, 1998)

$T = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$	A $\text{m}^2/(\text{MN})\text{B}^*t - \text{C}$	B -	C -	kruipbelasting σ_1 MN/m^2
BK1	0,011	2,35	0,225	0,72 - 1,68
BK2	0,009	2,05	0,221	0,72 - 1,92
GZ2	0,0065	1,7	0,17	1,95 - 4,55

$t = \text{tijd [uur]}$

4.1.3. TRIAXIALE STERKTE BIJ -10 EN -20 °C

Triaxiaaltesten zijn uitgevoerd met kleimonsters uit het Westerschelde boortraject om de mogelijke effecten van bevriezing op de korrelstructuur en de elasticiteit te bepalen. Op basis van een serie triaxiale sterktesten op grondmonsters is vastgesteld dat er een significante verandering van de stijfheid optreedt. Bij deze testen zijn verschillende steundrukken gebruikt: 0 tot $2\text{ MN}/\text{m}^2$.

In Tabel 4.2 en 4.3 staan kengetallen van de voor de Westerscheldetunnel uitgevoerde cryogene triaxiaal testen samengevat in Tabel 4.2 en 4.3. De waarden van Tabel 4.2 en 4.3 zijn gebaseerd op resultaten van cryogene triaxiaaltesten.

Uit deze testen kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

De elasticiteitsmodulus E is afhankelijk van de opgelegde deviatorspanning q . De elasticiteitsmodulus E neemt af bij hogere deviatorspanning q .

De wrijvingshoek ϕ is nauwelijks afhankelijk van de vriestemperatuur. De cohesie c neemt significant toe bij triaxiaal testen onder een lagere temperatuur.

Tabel 4.2 Rekenwaarden van wrijvingshoek ϕ , cohesie c elasticiteit E van bevroren grondsoorten bij $T = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Jessberger, 1998).

$T = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$	ϕ [$^{\circ}$]	cohesie c [MN/m^2]	elasticiteitsmodulus E bij σ -deviator van $0,3\text{ MN}/\text{m}^2$ [MN/m^2]				elasticiteitsmodulus E bij σ -deviator van $0,5\text{ MN}/\text{m}^2$ [MN/m^2]			
			2 dagen	1 week	2 weken	6 weken	2 dagen	1 week	2 weken	6 weken
Z1	30	1,87	470	420	380	320	340	290	250	230
BK1	9,0	0,94	170	150	130	120	140	120	110	90
BK2	5,2	0,93	170	150	130	120	140	120	110	90
GZ2	30	1,87	470	420	380	320	340	290	250	230

Tabel 4.3 Rekenwaarden van wrijvingshoek ϕ , cohesie c elasticiteit ε van bevroren grondsoorten bij $T = -20^\circ \text{C}$ (Jessberger, 1998).

T = -20 °C	ϕ [°]	cohesie c [MN/m ²]	elasticiteitsmodulus E bij σ -deviator van 0,3 MN/m ² [MN/m ²]				elasticiteitsmodulus E bij σ -deviator van 0,5 MN/m ² [MN/m ²]			
			2 dagen	1 week	2 weken	6 weken	2 dagen	1 week	2 weken	6 weken
Z1	30	2,94	910	800	740	640	720	630	570	490
BK1	9,0	1,88	300	270	250	230	300	270	250	230
BK2	5,2	2,4	300	270	250	230	300	270	250	230
GZ2	30	2,94	910	800	740	640	720	630	570	490

4.1.4. 1D-VORSTHEFFING

Vorstheffing hangt af van de fysische eigenschappen van de grond (korrelgrootte, waterdoorlatendheid, watergehalte, etc.) én is afhankelijk van de totaalspanning. Op basis van laboratoriumexperimenten wordt gesteld dat vorstheffing en ijslensgroei plaatsvinden loodrecht op de isothermen van het vrieslichaam (zie par. 2.8).

De vorstheffing wordt in een standaardproef ééndimensionaal uitgevoerd in een 'frost heave apparatus'. Hierbij wordt in een cilindrisch monster de axiale uitzetting gemeten onder 1-dimensionale bevrozing. De bodemplaat van de vriescel wordt gekoeld en de temperatuur van de bovenplaat wordt constant gehouden (Konrad & Morgenstern, 1981).

SEGREGATIEPOTENTIAAL SP_0

Het effect van verticale spanning op de segregatiepotentiaal SP kan experimenteel met de volgende formule afgeleid worden (Konrad & Morgenstern, 1984):

$$SP(p) = SP_0 \cdot e^{-a \cdot \sigma_n}$$

waarin:

SP (p) = segregatie potentiaal onder belasting p

SP₀ = segregatie potentiaal zonder extra belasting

σ_n = gedefinieerd als spanning loodrecht op het vorstfront

a = grondfactor (Konrad & Morgenstern, 1984)

Uit de formule van Konrad & Morgenstern (1984) wordt dan afgeleid:

$$h(p) = h_0 \cdot e^{-a \cdot p}$$

waarin:

h(p) = vorstheffing onder belasting [m]

h₀ = vorstheffing zonder belasting [m]

a = grondfactor [-]

p = belasting [MN/m²]

De grondfactor a kan bepaald worden wanneer bij verschillende belastingen de vorstheffing experimenteel wordt vastgesteld. De grondfactor a kan dan vervolgens empirisch worden bepaald behulp van de resultaten van minimaal twee metingen:

BK1 klei: $a = 2,4 \text{ m}^2/\text{MN}$

BK2 klei: $a = 5,2 \text{ m}^2/\text{MN}$

In paragraaf 9.2 wordt aangegeven hoe met deze grondfactor a meer informatie over vorstheffing verkregen kan worden.

4.2. LABORATORIUMONDERZOEK 3D-VORSTHEFFING

In 1999 en 2000 is laboratoriumonderzoek uitgevoerd om te kunnen anticiperen op geomechanische veranderingen in de grond door kunstmatige grondbevriezing. Het onderzoek is gericht op het driedimensionale vervormingsgedrag van bevroren zand en klei onder in-situ omstandigheden (TNO-NITG, 2000).

In een speciale 3D-triaxiaal vorstheffing apparaat zijn cilindervormige grondmonsters van de Klei van Boom (Westerscheldetunnel) en van de Formatie van Twente (HSL-Zuid Groene Hart spoortunnel) aan speciale triaxiaaltesten met een axiaal geplaatste vrieslans getest.

In dit onderzoek zijn 32 cryogene triaxiaal experimenten uitgevoerd met zand en klei waarvan de resultaten redelijk eenduidig zijn. De temperatuur van de axiale vrieslans bedroeg hierbij -15°C en -30°C . Grondmonsters zijn onder in-situ spanningscondities geconsolideerd.

De axiale en radiale vervorming (resp. evenwijdig en loodrecht op de vrieslans) van de cilindrisch grondmonsters zijn continu geregistreerd in gedraineerde en ongedraineerde testen. De meetresultaten duiden aan dat er in de axiale richting zeer kleine deformaties optreden tijdens bevriezing. Tevens wordt drainage (wateruitdrijving of aanzuiging) en de temperatuur van de vrieslans continu geregistreerd. Uit de resultaten van de experimenten is gebleken dat het vervormingsgedrag van axiaal bevroren grond anisotroop verloopt. De volumeverandering is hoofdzakelijk afhankelijk van

1. de grondsoort;
2. de vriestemperatuur;
3. de oriëntatie van de vrieslansen ten opzichte van de geologische gelaagdheid;
4. de drainage omstandigheden.

Bevriezing van cilindrische grondmonsters verloopt in twee fasen: (a) initiële bevriezing van grondwater en (b) ijslensvorming en ontstaan van een nieuwe spanningstoestand in het grondmonster.

Zand

In de axiale richting (evenwijdig aan de vrieslans) vertoont gedraineerd zand in de eerste fase van bevriezing een contractie tot 0,06 %, terwijl na enige tijd deze contractie stabiliseert en weer gereduceerd wordt tot lagere vervormingen. In radiale richting vertoont zand eerst een contractie tot maximaal 0,15 % en daarna een stabilisatie met kleine vervorming. Niet alle uitgevoerde testen met zand verlopen volgens dit beeld. De ongedraineerde testen met zand laten een axiale dilatantie zien tot 2,6 %.

Klei

De axiale bevriezing van klei verloopt geheel anders dan van zand. Klei vertoont in de axiale richting weliswaar in de eerste fase een contractie tot 0,2 %, maar deze wordt daarna gereduceerd en kan overgaan tot maximaal 0,15 % dilatatie. In de radiale richting is de uitzetting bij klei zeer groot en in de richting loodrecht op de gelaagdheid bereikt deze waarden tot 2,9 %. De vervorming in deze richting stabiliseert niet en duurt meestal voort tot het einde van de test door ijslensvorming.

De grootste uitzettingen zijn gemeten bij ongedraineerd zand in de axiale richting, en bij gedraineerde klei in de richting loodrecht op de isothermen en loodrecht op de geologische gelaagdheid.

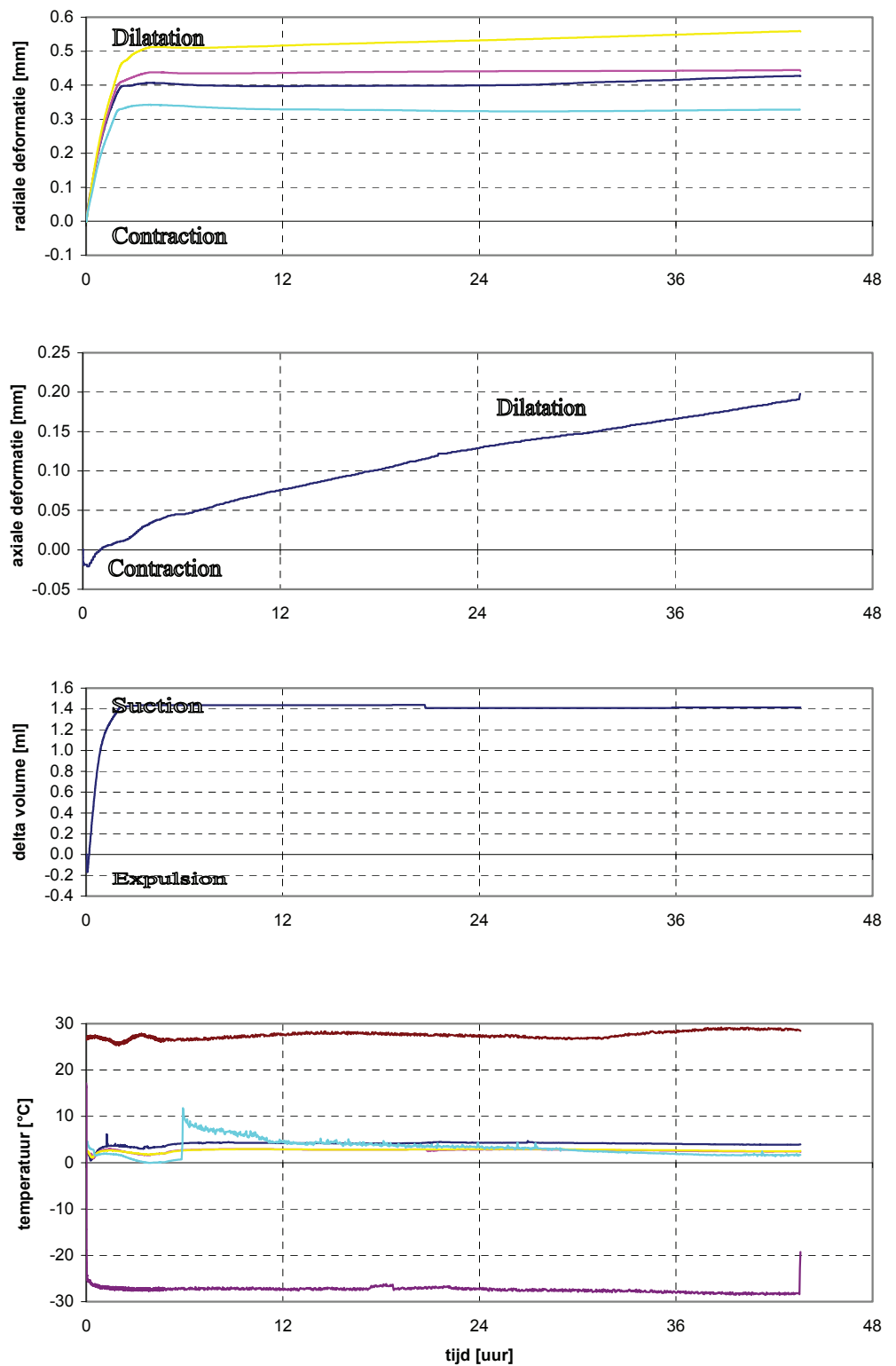
In Figuur 4.2 en 4.3 staan voorbeelden van representatieve testresultaten van driedimensionale vorstheffing. Voor meer informatie wordt verwezen naar TNO-NITG (2000).

4.3. SAMENVATTING

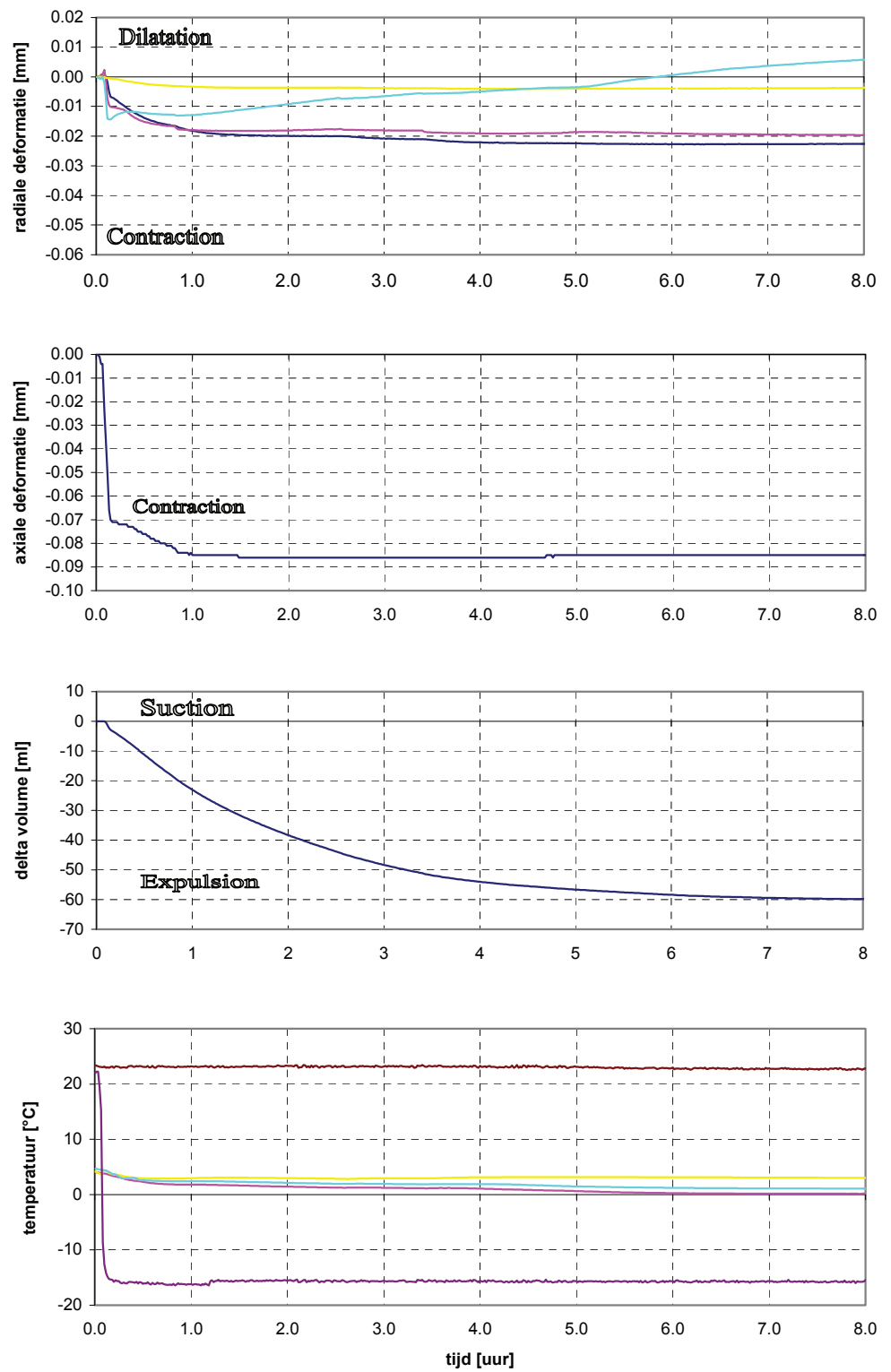
De resultaten van de druk- en treksterkten van een grondsoort bij een lage temperatuur worden gebruikt om te controleren of er voldoende sterkte en stijfheid bereikt wordt om de ontgraving onder atmosferische condities uit te voeren.

De resultaten van de kruipproeven worden gebruikt om lange termijn deformaties van de bevroren grond te berekenen.

De 1D-vorstheffing wordt gebruikt om te bepalen of een grondsoort vorstgevoelig is. De segregatiepotentiaal SP_0 kan niet gebruikt worden om de uitzetting in relatie tot de deformatie van de tunnelwanden te bepalen. Een 3D-vorstheffingsproef is wel geschikt om de uitzetting van bevroren grond in te kunnen schatten.



Figuur 4.2 Testresultaten van axiale bevrozing van het Laagpakket van Boom. De lithologische samenstelling van de grond is siltige klei. (gedraineerde test FR21; TNO-NITG, 2000).



Figuur 4.3 Testresultaten van axiale bevrozing van monsters uit de Formatie van Twente. De lithologische samenstelling is fijn zand (gedraineerde test FR₃; TNO-NITG, 2000).

5. THERMISCHE EIGENSCHAPPEN VAN BEVROREN GROND

5.1. WARMTECAPACITEIT VAN GROND

Warmtecapaciteit c en thermische geleidbaarheid λ

De snelheid van de verlaging van de temperatuur wordt gestuurd door de aan de grond toegevoerde hoeveelheid energie, bijvoorbeeld door vrieslansen. De door de grond benodigde energie per volume-eenheid grond en per graad temperatuurverandering wordt de warmtecapaciteit c genoemd [$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$]. De faseovergang van water naar ijs verlangt een extra energie-impuls (latente energie).

De periode waarover deze extra warmte als het ware onttrokken moet worden (energie-impuls) is afhankelijk van de fractie onbevroren water in de grond. In slecht doorlatende grondsoorten is de afname van de fractie onbevroren water met de afname van de temperatuur kleiner dan in goed waterdoorlatende grondsoorten. Daarbij komt dat de snelheid waarmee een volume-eenheid grond kan bevroren afhankelijk is van de geleidbaarheid van warmte (thermische conductiviteit).

In de volgende hoofdstukken zullen afzonderlijk de formules behandeld worden voor respectievelijk: de fractie onbevroren water, warmtecapaciteit c , thermische conductiviteit λ (of warmte-geleidbaarheid) en latente warmte. Daarna wordt de invloed van opgeloste stoffen zoals de zoutconcentratie behandeld.

5.2. THERMISCHE EIGENSCHAPPEN BEVROREN GROND

Bij bestudering van thermische veranderingen van grond is kennis van de thermische eigenschappen vereist: thermische geleidbaarheid λ en de warmtecapaciteit c . Deze parameters variëren met temperatuur, grondtype, water- en/of ijsgehalte, verzadigingsgraad en de korrel dichtheid. Tabel 5.1 toont gemiddelde waarden van thermische eigenschappen van klei, zand, water en ijs.

Tabel 5.1 Thermale eigenschappen van minerale grond en water/ijs (Harris, 1995)

materiaal	dichtheid ρ [kg/m^3]	warmtecapaciteit c [$\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$]	thermale geleidbaarheid λ [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$]
klei, droog	1700	0,92	0,9
zand, droog	2000	0,80	1,1
kwarts	2660	0,733	8,4
ijs (-40°C)	900	2,09	2,66
ijs (0°C)	900	2,09	2,21
water (0°C)	1000	4,22	0,56

5.2.1. BEPALING VAN DE WARMTECAPACITEIT

De warmtecapaciteit c [kJ/(m³.K)] van een grondmonster is de hoeveelheid warmte die nodig is om de temperatuur één graad te laten stijgen. De warmtecapaciteit van de grond wordt berekend door die van de samenstellende delen (water en mineralen) bij elkaar op te tellen (Andersland & Ladanyi, 1994).

De warmtecapaciteit C is op de volgende manier voor onbevroren, gedeeltelijk bevroren en bevroren grond te bepalen (Jessberger & Jagow-Klaff, 1996):

$$C_{onbevr} = \rho_d \left(C_k + C_w \cdot \frac{W}{100} \right)$$

$$C_{ged}(T) = \rho_d \left(C_k + C_w \cdot \frac{W_u}{100} + C_i \cdot \frac{(W - W_u)}{100} \right) = \rho_d \left(C_k + C_w \cdot \frac{A|T|^B}{100} + C_i \cdot \frac{(W - A|T|^B)}{100} \right)$$

$$C_{bevr} = \rho_d \left(C_k + C_i \cdot \frac{W}{100} \right)$$

waarin:

ρ_d	droge dichtheid	kg/m ³
C_k	specifieke warmtecapaciteit van korrels	kJ/kgK
C_i	specifieke warmtecapaciteit van ijs	kJ/kgK
C_w	specifieke warmtecapaciteit van water	kJ/kgK
W	watergehalte	-
W_u	onbevroren watergehalte	-

Door de aanwezigheid van een fractie onbevroren water is de warmtecapaciteit voor bevroren grond een functie van de temperatuur en zodoende per definitie niet constant.

5.2.2. BEPALING VAN DE CONDUCTIVITEIT

De thermische conductiviteit λ (of warmtegeleiding) van een sediment kan in een laboratorium gemeten worden, maar kan ook heel goed op basis van mineralogische samenstelling berekend worden (Johansen, 1975; zie ook par. 2.6 en Tabel 5.2). Hierin spelen vanzelfsprekend het watergehalte en de fractie onbevroren water een rol. Johansen (1975) stelde hiermee een analytische methode op die gebaseerd is op de partiële thermische geleidbaarheid van de fracties water, korrelskelet en ijs. Ter plaatse van beide dwarsverbindingen wordt alleen volledig verzadigde grond gevonden.

Johansen (1975) stelde hiermee een geometrische methode voor die gebaseerd is op thermische geleidbaarheid λ van de samenstellende delen en hun respectievelijke volume fracties. De beste resultaten worden behaald met onbevroren en bevroren grond (grof en fijn) bij een verzadigingsgraad hoger dan 10%. De thermische geleidbaarheid van onbevroren en bevroren minerale grond kan dan berekend worden.

Tabel 5.2 Partiële conductiviteiten volgens Johansen (1975)

partiële thermale conductiviteiten	[kgm/Ks ³] of [W/mK]
λ_s	4,5
λ_w	0,605
λ_i	2,23

De warmtegeleidbaarheid van bevroren grond wordt verkregen door de termen λ_{dry} , λ_{sat} en λ_i aan te passen voor de waarden van de betreffende grondsoorten. Vervolgens wordt met semi-empirische vergelijkingen (of grafieken) met de bekende porositeit (vol. %), droge dichtheid (kg/m³) en dichtheid van minerale bestanddelen (kg/m³) de warmtegeleidbaarheid van de specifieke bevroren grond bepaald (fig. 5.1).

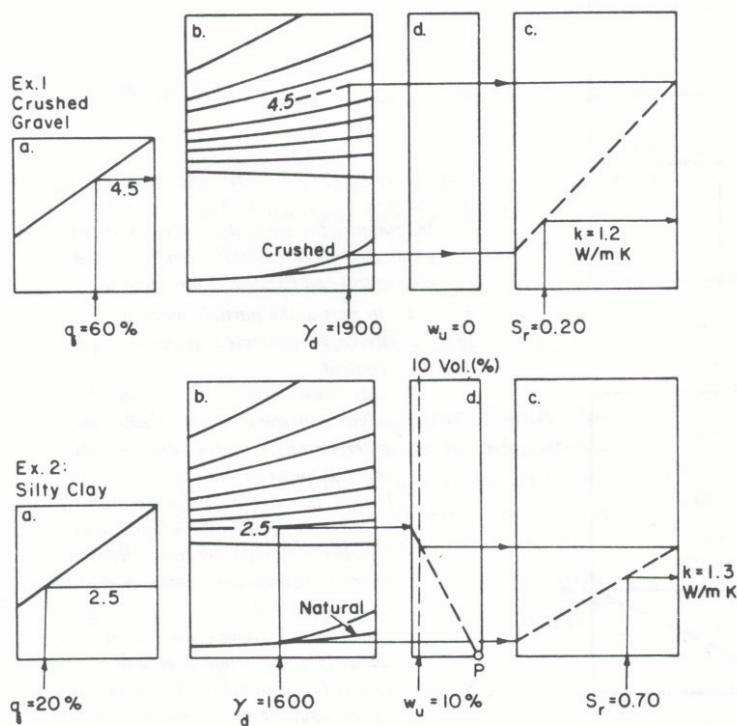
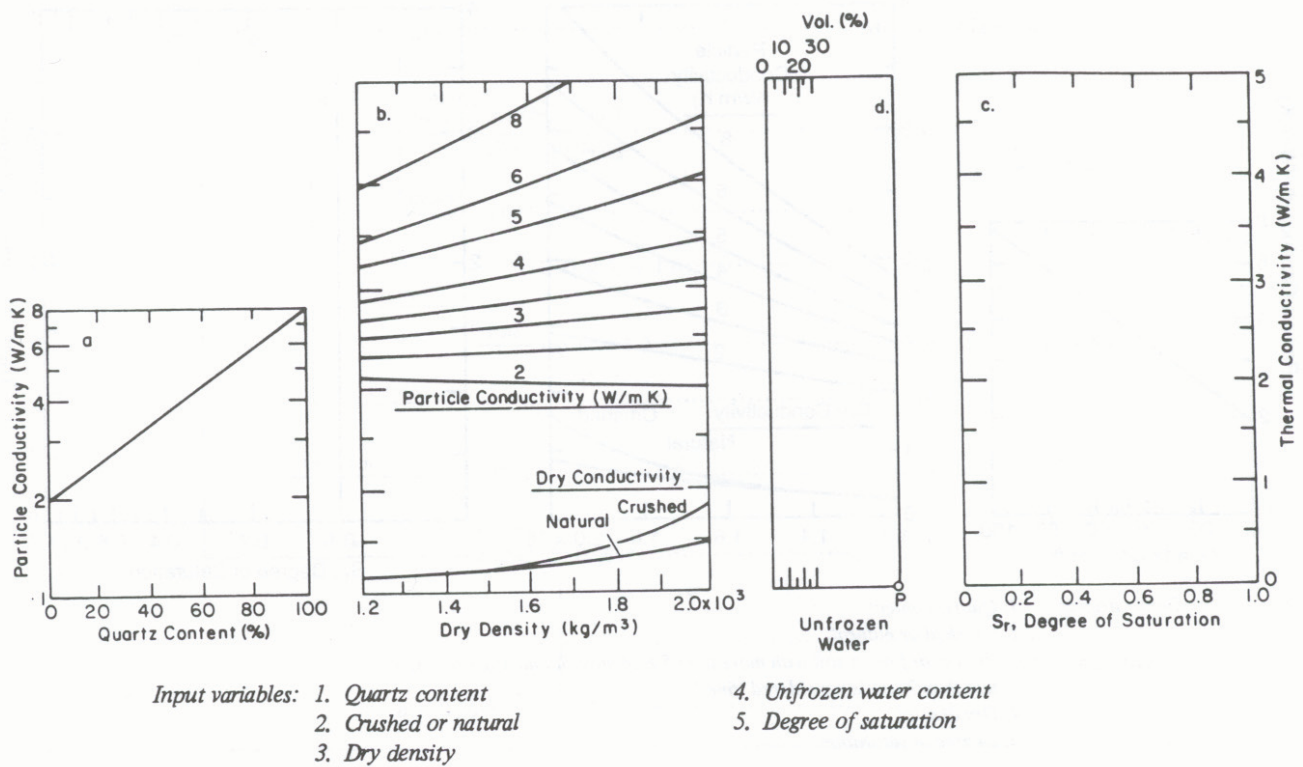
De methode van Johansen (1975) is in dit project gebruikt om geleidbaarheid van bevroren zand en klei met grondeigenschappen van Z1 en BK1/BK2 te berekenen. In Tabel 5.3 zijn benaderingen van de geleidbaarheid van het zand van Z1 aangegeven. In Tabel 5.4 zijn benaderingen van de geleidbaarheid van BK1 en BK2 gegeven.

Tabel 5.3 Geleidbaarheid van Z1 (γ_{dr} = droge volumieke massa, kw = kwartsgehalte, S_R = verzadigingsgraad)

Z1 $\gamma_{dr} = 15,5 \text{ kN/m}^3$	geleidbaarheid	warmtecapaciteit
kw = 100% Sr = 100%	λ [W/m.K]	c [kJ/m ³ .K]
onbevroren zand	2,6	2700
bevroren zand	4,6	2000

Tabel 5.4 Geleidbaarheid van BK1 en BK2 (γ_{dr} = droge volumieke massa, kw = kwartsgehalte, S_R = verzadigingsgraad)

BK1 en BK2 $\gamma_{dr} = 16,2 \text{ kN/m}^3$	geleidbaarheid	warmtecapaciteit
kw = 0% Sr = 100%	λ [W/m.K]	c [kJ/m ³ .K]
onbevroren klei	1,15	2700
10% bevroren poriënwater	1,45	2400
20% bevroren poriënwater	1,65	2200
bevroren klei	1,90	2000



Instructions for use of the diagrams are explained by two examples: Example 1 for a coarse soil and Example 2 for a fine soil:

1. In part a the particle thermal conductivity is estimated from the quartz content.
2. This value is then used in part b, together with the given dry density, for determining the thermal conductivity in the saturated condition.
3. The conductivity of the dry materials at the same dry density is found from the curves marked dry conductivity in part b.
4. If a certain percentage of the water is unfrozen, then the saturated thermal conductivity must be reduced in the manner shown by the graphical construction in part d.
5. The thermal conductivity at the actual degree of saturation is then found by linear interpolation as in part c.

Figure 2-25. Thermal conductivity of frozen mineral soils. (After Johansen, 1975.)

Figuur 5.1 Bepaling van de thermische geleidbaarheid volgens Johansen (1975).

5.3. ZOUTCONCENTRATIE

De invloed van opgeloste stoffen in water, zoals zout, op de vriespuntsverlaging is bekend en kan uit bestaande tabellen gehaald worden. Wanneer water-verzadigd zand bevroert zal het water door volumevergroting van het reeds bevroren water uitgedreven worden. Daarnaast vindt uitdrijving van zout plaats. Dat betekent dat de zoutconcentratie in het uitgedreven water alsmaar toeneemt waardoor vriespuntsverlaging aan het vorstfront optreedt. Over het algemeen is daar nog geen goede relatie voor. In Tabel 5.5 staan de respectievelijke vriespuntsverlagingen bij verschillende concentraties opgelost NaCl in het grondwater.

Tabel 5.5 Concentraties zoutgehalte in de geotechnische eenheden bij DV1 en DV2

eenheid	concentratie Cl - [mg/l]		vriespuntsverlaging [°C]
Z1	3400-6600	zout	0,06-0,18
BK1	2000-13000	zout	0,00-0,31
BK2	< 1000	brak	< 0,0
GZ2	< 1000	brak	< 0,0

5.4. CONVECTIE

Bij temperatuurveranderingen in vloeistoffen treedt convectie op. Convectie is gebaseerd op dichtheidsstroming. De dichtheid van een vloeistof is mede afhankelijk van de temperatuur. Bij grondbevriezing, bevriezing van grondwater, treedt ook convectie op. Toch wordt aangenomen dat de invloed hiervan zeer beperkt is. Convectie kan immers alleen in vloeistoffen optreden en zodoende alleen tot aan het vriespunt.

Convectie kan een rol spelen op de plaatsen waar het vrieslichaam nog niet gesloten is, zoals tegen de (ware) tunnelsegmenten aan of op plaatsen waar het zoutgehalte is verhoogd door segregatie van ijs en zout bij bevriezing.

5.5. SAMENVATTING

Ten behoeve van een ontwerp van een bevroren grondlichaam is het noodzakelijk informatie te hebben over de warmtecapaciteit en de warmtegeleidbaarheid van de grond. Deze informatie is nodig voor bepaling van de temperatuurontwikkeling van het vrieslichaam. Het is praktisch moeilijk om deze parameters experimenteel vast te stellen, maar er bestaan methodieken om deze empirisch en analytisch te berekenen.

6. MEETPROGRAMMA F100

Om de grondbevriezing van DV1 en DV2 van de Westerscheldetunnel te monitoren is de ontwikkeling van de temperatuur en de deformatie van de grond en tunnel gemeten. Deze nauwkeurige metingen zijn tijdreeksen en meten de veranderingen van grond- en tunneldeformatie bij DV1 en DV2. De gegevens zijn afkomstig van KMW (Metingen A) en de F100 uitvoeringscommissie (Metingen B).

6.1. METINGEN A: KMW

Naast het vriezen en dooien hebben activiteiten zoals ontwatering, ontgraving en bekleding van de dwarsverbinding naar verwachting invloed op de water- en grondspanningen. Vanwege deze reden worden de beschrijvingen van bouwactiviteiten bij DV1 en DV2 van KMW gebruikt bij de analyse van de meetgegevens. De tijdstippen van de bouwactiviteiten van de dwarsverbindingen worden gebruikt in de analyse. Voor DV1 en DV2 zijn de meest relevante bouwactiviteiten samengevat in Bijlage A en B.

In Bijlage C staan de werktekeningen van KMW met de locaties van de meetapparatuur in de oost- en westbuis aangegeven:

Bijlage C1	Positie van segmentringen, westbuis (KMW tek. W-TU3-VBO-527-g),
Bijlage C2	Ingemeten positie van temperatuurvoelers in meetlansen, oostbuis DV1 (KMW tek. W-TU4-HC5-851-c)
Bijlage C3	Ingemeten positie van temperatuurvoelers in meetlansen, oostbuis DV2 (KMW-tek. W-TU4-HC5-852-a)
Bijlage C4	Temperatuurvoelers op staalsegmenten, oostbuis (KMW tek. W-TU3-VBO-665-d)
Bijlage C5	Positie temperatuurvoelers, westbuis (KMW- tek. W-TU4-BT3-001)

De locaties van de 22 vrieslansen, de toegangsdeur tot de dwarsverbinding en de ontwateringsbuis (veiligheidsventiel) zijn bijgevoegd (Bijlage C2: KMW tekening W-TU4-HC5-665-b). De vrieslansen, de temperatuurlansen en de ontwateringsbuis zijn ingebracht vanuit de oostbuis.

De locaties van de A- en C-punten op de tunnelsegmenten waarvan de absolute verplaatsingen worden ingemeten gedurende de aanleg van de dwarsverbinding zijn bijgevoegd (Bijlage C1: KMW tek. W-TU4-HC5-527-g). In de Bijlagen C3, C4 en C5 staan de posities van de temperatuuropnemers aangegeven.

Bij DV1 zijn tevens kernmonsters van het aangebrachte spuitbeton genomen om de sterkte te bepalen. De resultaten van de experimenteel bepaalde sterkte staan gegeven in par. 6.15.

6.2. METINGEN B: F100

In dit hoofdstuk wordt de opzet van het speciale F100 meetprogramma besproken. Voor een meer gedetailleerde beschrijving wordt verwezen naar het Meet en Instrumentatieplan (GeoDelft, 1999) en het installatierapport van de instrumenten (GeoDelft, 2000; Peters et al., 2000).

6.2.1. MEETAPPARATUUR IN DE GROND

Bij DV1 en DV2 is de volgende monitoringapparatuur geplaatst. Bij ieder meetapparaat is de meetnauwkeurigheid gegeven.

Extensometer (EX); nauwkeurigheid verplaatsingsmeter is 0,2 mm.

Hellingmeetbuis/inclinometer (HE); nauwkeurigheid horizontale verplaatsing bedraagt 0,25 mm/m. De horizontale hoekfout over de hele verticaal bedraagt 5°.

Spade cel (SC) en **Stress Monitoring Station (SM)**; de nauwkeurigheid van de meetsensoren in beide type instrumenten bedraagt 0,1% van de volle schaal. Bij een bereik van de gronddrukcel van 700 kPa is dit dus 0,7 kPa. Bij een bereik van de waterspanningsmeter van 350 kPa is dit dus 0,35 kPa. De nauwkeurigheid van metingen is verder afhankelijk van andere factoren zoals de correctie voor temperatuur en luchtdruk. Bij de genoemde bereiken van 350 kPa en 700 kPa is de totale nauwkeurigheid van de meting respectievelijk 0,5 en 1 kPa. Bij een bereik van 1400 kPa (dwarsverbinding 2 en SM2B van dwarsverbinding 1) is de nauwkeurigheid van de gronddrukmeting 2 kPa.

Temperatuurmeter (TE); de nauwkeurigheid van de sensor is 0,1 °C.

Waterspanningmeting (VW); zie punt 3, de nauwkeurigheid van de waterdrukmeting is 0,5 kPa bij een bereik van 350 kPa.

Temperatuurmeting (T); thermosensoren van KMW vanuit hoofd-tunnelbuizen); de nauwkeurigheid bedraagt 0,1 °C.)

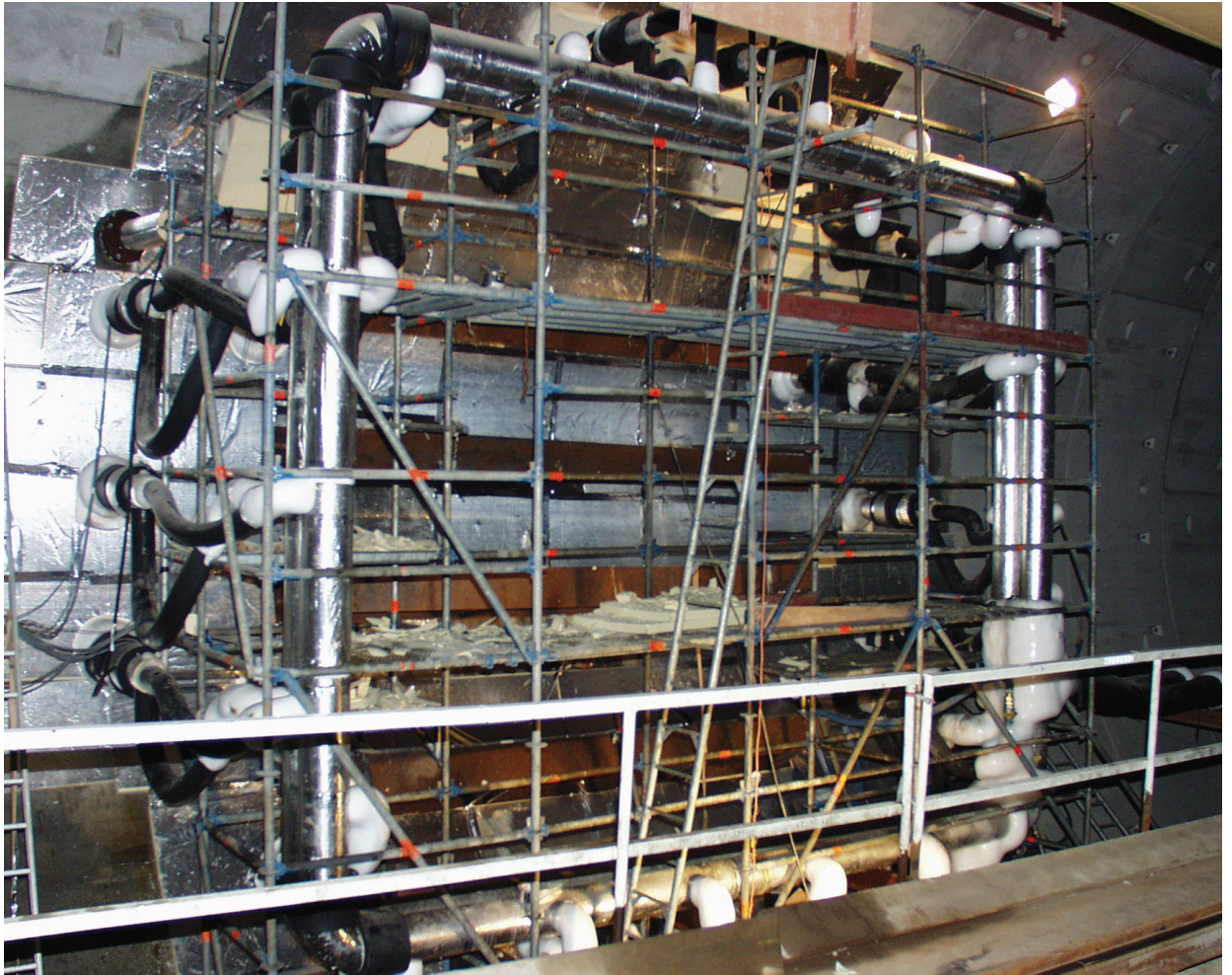
6.2.2. METHODE PLAATSING EN AFWERKING BOORGATEN

De spade cellen zijn weggedrukt nadat eerst een gat tot een meter boven de installatiediepte is gepulst. De stress monitoring stations worden in een gepulst gat uitgericht.

Bij de spade cellen worden relatief hoge horizontale grondspanningen gemeten omdat de grond door de grondverdringing rond de spade cellen bij de installatie wordt verstoord.

De installatieprocedure van de stress monitoring stations brengt juist een ontspanning van de omringende grond teweeg. Bovendien heeft de aangevulde grond een lagere effectieve spanning op die diepte door lagere verdichtingsgraad. De nulmetingen van beide instrumenten zijn daarom niet representatief voor de oorspronkelijke verticale en horizontale grondspanningen.

In totaal zijn er voor de twee dwarsverbindingen 26 pulsboringen uitgevoerd. Alle boorbuizen (diameter 180 mm uitwendig) zijn na het plaatsen van de instrumenten weer getrokken. Alle boorgaten zijn nagemeten op verticaliteit. De boringen zijn conform grondopbouw laagsgewijs afgedicht met zwelklei BK300 en aanvulgrind. In het installatierapport (GeoDelft, 2000) is per boring de samenstelling van de afdichting over de diepte van het boorgat aangegeven.



6.3. TRAJECTEN IN HET VRIES- EN DOOIPROCES

De volgende hoofdactiviteiten van de grondbevriezing ten behoeve van de eerste twee dwarsverbindingen worden in deze rapportage beschouwd (zie ook Bijlage A en B). Er worden drie spanningsrichtingen onderscheiden:

*evenwijdig aan de vrieslansen,
loodrecht op de as van de dwarsverbinding ~ oost-west,
verticaal.*

In de hoofdstukken 7 en 8 wordt gesproken over de volgende fasen van grondbevriezing. Deze fasen staan als balken weergegeven op de grafieken met meetgegevens in Bijlagen E t/m J en K t/m N.

vriezen

de vriesmachine draait in principe op 100% vermogen.

vriezen-ontgraven

de vriesmachine draait op 100% vermogen en de ontgraving vindt plaats met licht materieel.

vriezen-bekleden.

de vriesmachine draait op 100% vermogen en het spuitbeton en de betonnen bekisting wordt aangebracht.

vriezen op lagere capaciteit

de vriesmachine draait op 33% en dient als overgangperiode naar de volledige dooifase.

dooien

de vriesmachine is uitgezet.

De trajecten “ontgraven” en “bekleden” vallen beide in de periode waarin gevroren wordt. Toch zullen ze apart besproken worden. Het traject “vriezen” beslaat derhalve de periode tot aan ontgraven. Deze hoofd- en subtrajecten zijn terug te vinden in de grafiek en bijlagen en zijn aangegeven met verticale lijnen en een karakteristieke markering.

6.4. METINGEN B: MEETPROGRAMMA BIJ DWARSVERBINDING DV1

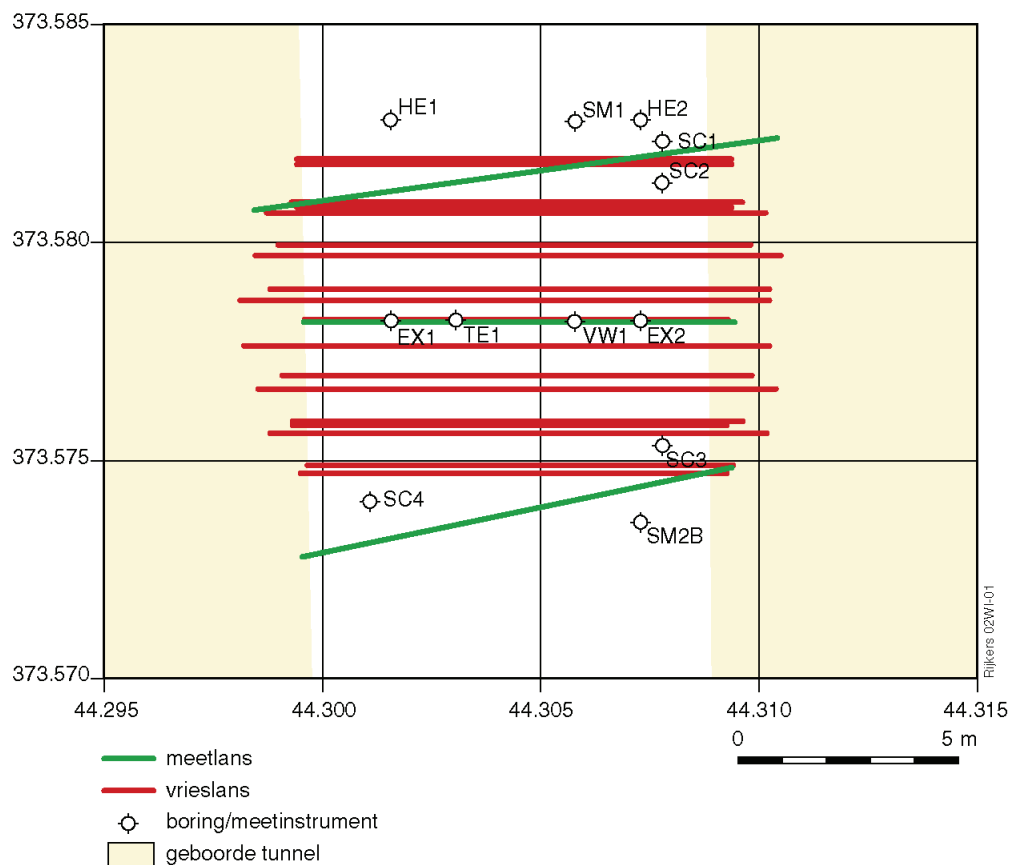
Voor dwarsverbinding-1 is een overzicht gegeven van de gebruikte meetinstrumenten (Tabel 6.1). De Metingen A zijn verzameld door KMW; deze metingen zijn alle vanuit de hoofdtunnels gemeten met instrumenten in en bij de tunnelwanden. De metingen B zijn gemeten door GeoDelft in opdracht van COB/F100. Voor een volledige beschrijving van de plaatsing en de meetmethode van de gebruikte instrumenten wordt verwezen naar (GeoDelft 2000).

veldmeting	eenheid	instrument code	rapport, tekening of bijlage
------------	---------	-----------------	------------------------------

Metingen A (KMW)			
Verplaatsingen A-punten, westbuis	mm	A01 t/m A32	KMW tek. W-TU3-VBO-527-g Bijlage C1 (in Deel 2)
Temperaturen van meetlansen (oostbuis)	°C	T1 en T2	KMW tek. W-TU4-HC5-851-c Bijlage C2 (in Deel 2)
Temperaturen van tunnelsegmenten, oostbuis	°C	A-H	KMW tek. W-TU4-HC5-665-d Bijlage C4 (in Deel 2)
Temperaturen van staalsegmenten, westbuis	°C	A-H	KMW tek. W-TU4-BT3-001 Bijlage C5 (in Deel 2)
Temperatuurgegevens vriesinstallatie	°C	installatie KMW	KMW vriesinstallatie
Waterdruk U	kN/m ²	U1	KMW meting; Bijlage G2 (Deel 2)
Debiet - waterproductie	liter	D1	KMW meting; Bijlage A (Deel 2)
Convergentiemetingen, westbuis	mm	ring 93-97	KMW meting
Convergentiemetingen, oostbuis	mm	ring 93-97	KMW meting
Logboek KMW-activiteiten	tekst	logboek	Bijlage A (in Deel 2)

Metingen B (COB-F100)			
Hellingmeetbuis - horizontale beweging	mm	HE1, HE2	GeoDelft (2000) CO-390501/61
Extensometers - verticale beweging	mm	EX1, EX2	GeoDelft (2000) CO-390501/61
Temperatuursensor	°C	TE1	GeoDelft (2000) CO-390501/61
Spade cell: horizontale gronddruk temperatuur T	kN/m ² °C	SC1, SC2, SC3, SC4	GeoDelft (2000) CO-390501/61
Stress monitoring station: gronddruk σ_{tot} waterspanning u temperatuur T	kN/m ² kN/m ² °C	SM1, SM2b	GeoDelft (2000) CO-390501/61
Waterspanning u	kN/m ²	VW1	GeoDelft (2000) CO-390501/61
Sterkte spuitbeton	kN/m ²	-	par. 7.8 dit rapport

Tabel 6.1 Overzicht van monitoringprogramma bij DV1.



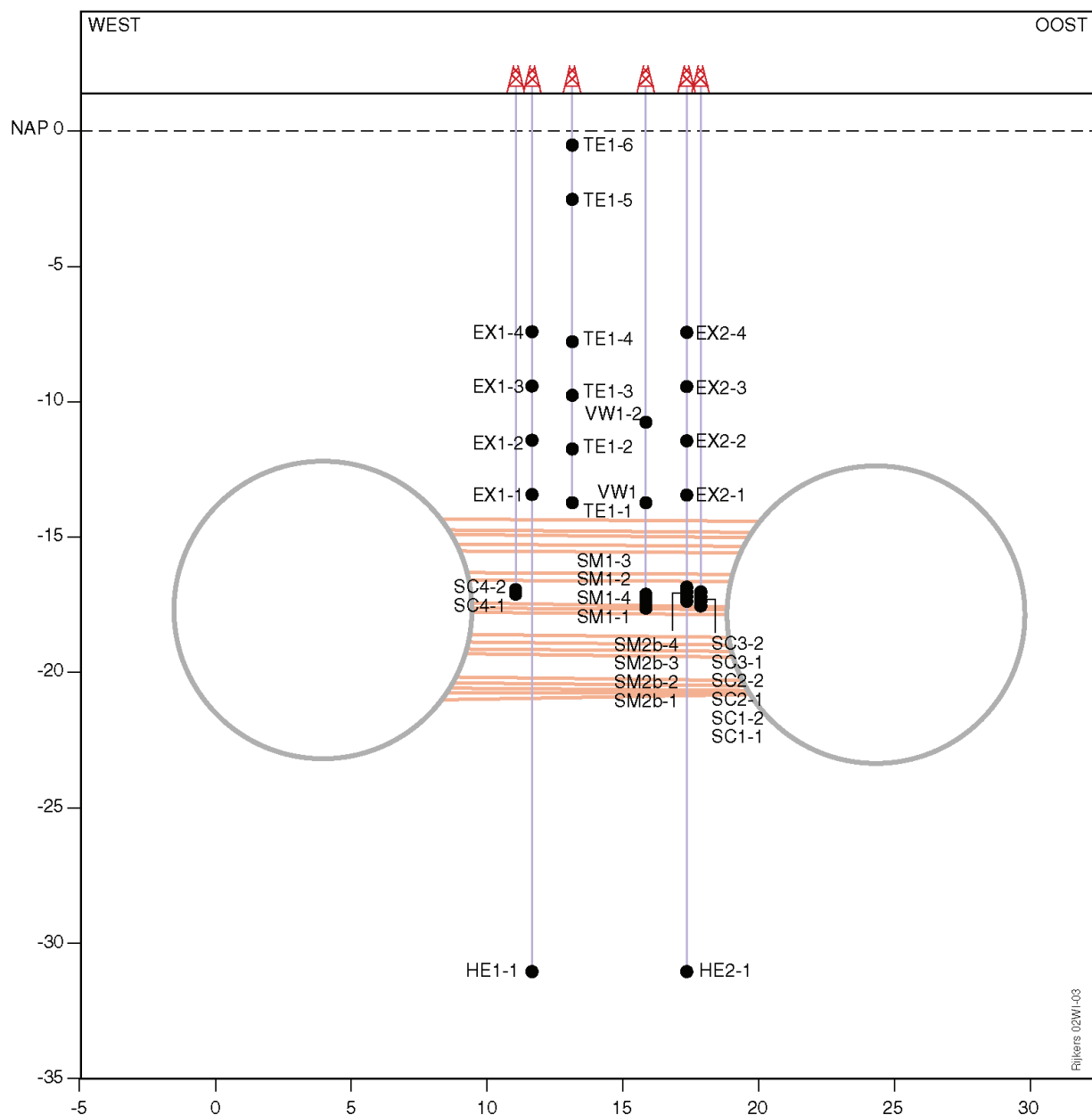
Figuur 6.2 Situatie bij DV1 van vrieslansen en F100 monitoringapparatuur; bovenaanzicht (SM2b is de vervangende locatie van SM2).

6.5. MEETFREQUENTIE METINGEN B BIJ DV1

In tabel 6.2 wordt een overzicht gegeven van de meetfrequentie van de uitgevoerde metingen B bij DV1.

fase bouwproces	meetperiode	uitgevoerde metingen	meetfrequentie
voor aanvang vriezen	13 april – 7 mei (nulmeting)	hellingmeter	1 keer (dubbele meting)
		automatische metingen	1 keer per uur
tijdens vriezen	8 mei – 6 september	hellingmeter	17 keer (5x buis bevroren)
		automatische metingen	1 keer per uur
tijdens ontdooien grond	7 september – 24 januari	hellingmeter	5 keer
		automatische metingen	tot 20 nov.: 1 keer per uur daarna 1 keer per 4 uur

Tabel 6.2 Overzicht meetfrequentie bij DV1



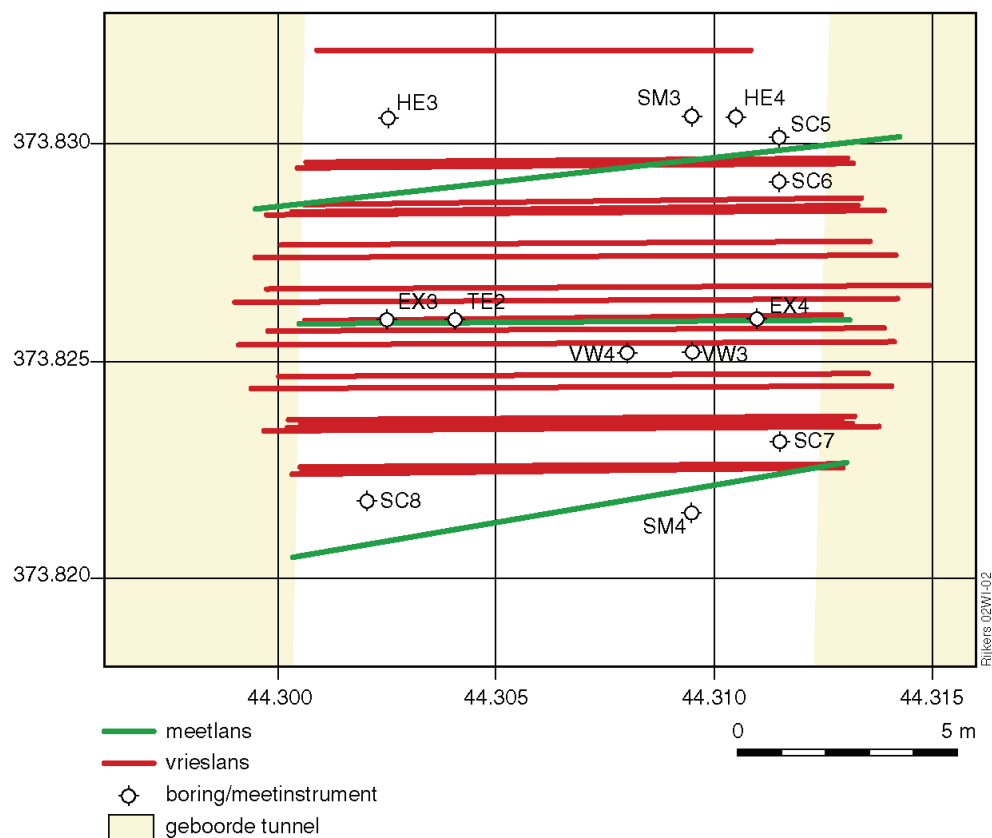
Figuur 6.3 Situatie bij DV1 van vrieslansen en F100 monitoringapparatuur; verticale oost-west doorsnede. Voor nadere specificaties van de in deze figuur gebruikte instrumentcoderingen zie bijlage D in Deel 2.

6.6. METINGEN B: MEETPROGRAMMA BIJ DWARSVERBINDING DV2

Voor dwarsverbinding-2 is een overzicht gegeven van de gebruikte meetinstrumenten (Tabel 6.3).

<i>Veldmeting</i>	<i>eenheid</i>	<i>instrument code</i>	<i>Rapport, tekening of bijlage</i>
Metingen A (KMW)			
Verplaatsingen A-punten, westbuis	mm	A01 t/m A32	KMW tek. W-TU3-VBO-527-g Bijlage C1 (in Deel 2)
Verplaatsing C-punten, westbuis	mm	C01-C32	KMW tek. W-TU3-VBO-527-g Bijlage C1 (in Deel 2)
Temperaturen van meetlansen, oostbuis	°C	T1 en T2	KMW tek. W-TU4-HC5-851-c Bijlage C3 (in Deel 2)
Temperaturen van tunnelsegmenten, oostbuis	°C	A-H	KMW tek. W-TU4-HC5-665-d Bijlage C4 (in Deel 2)
Temperaturen van staalsegmenten, westbuis	°C	J1, J2, K1, K2, K3, L1, L2, L3	KMW tek. W-TU4-BT3-001 Bijlage C5 (in Deel 2)
Temperatuurgegevens vriesinstallatie	°C	installatie KMW	KMW vriesinstallatie
Waterdruk U	kN/m ²	U2	KMW meting; Bijlage M3 (Deel 2)
Debiet - waterproduktie	liter	D2	KMW meting; Bijlage B (Deel 2)
Convergentiemetingen, westbuis	mm	ring 217-221	KMW-meting
Convergentiemetingen, oostbuis	mm	ring 217-221	KMW-meting
Logboek KMW-activiteiten	tekst	logboek	Bijlage B (in Deel 2)
Metingen B (COB-F100)			
Hellingmeetbuis - horizontale beweging	mm	HE3 / HE4	GeoDelft (2000) CO-390501/61
Extensometers - verticale beweging	mm	EX3 / EX4	GeoDelft (2000) CO-390501/61
Temperatuursensor in de grond	°C	TE2	GeoDelft (2000) CO-390501/61
Spade cell: horizontale gronddruk σ_{tot} temperatuur T	kN/m ² °C	SC5, SC6, SC7, SC8	GeoDelft (2000) CO-390501/61
Stress monitoring station - gronddruk σ_{tot} waterspanning u temperatuur T	kN/m ² kN/m ² °C	SM3, SM4	GeoDelft (2000) CO-390501/61
Waterspanning u	kN/m ²	VW3, VW4	GeoDelft (2000) CO-390501/61

Tabel 6.3 Overzicht van monitoringprogramma bij DV2.



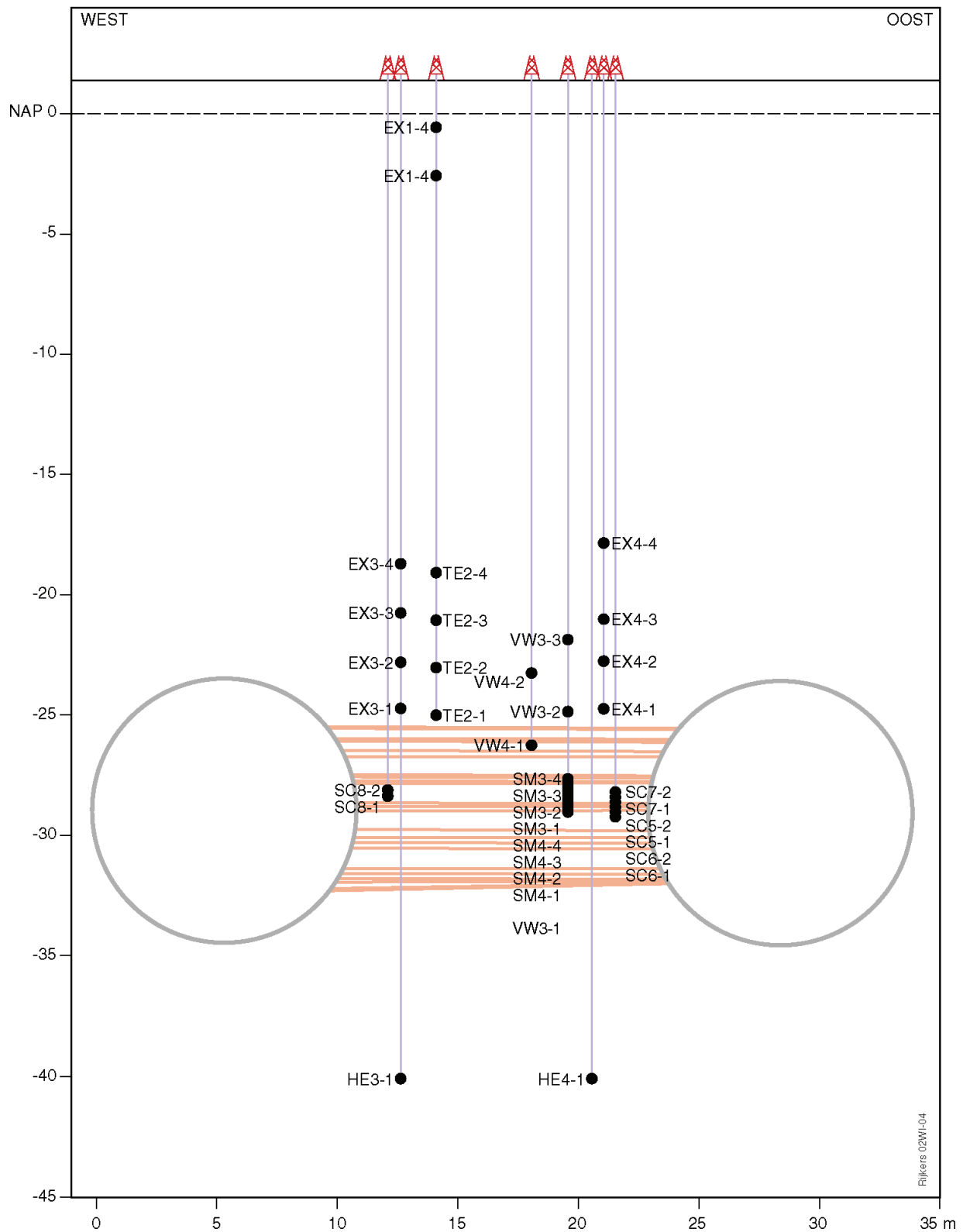
Figuur 6.4 Situatie bij DV2 van vrieslansen en F100 monitoringapparatuur

6.7. MEETFREQUENTIE METINGEN B BIJ DV1

In tabel 6.4 wordt een overzicht gegeven van de meetfrequentie van de uitgevoerde metingen B bij DV2.

Tabel 6.4 Overzicht meetfrequentie bij DV2

fase bouwproces	meetperiode	uitgevoerde metingen	meetfrequentie
voor aanvang vriezen	26 mei – 15 juni (nulmeting)	hellingmeter	4 x;
		automatische metingen	1 keer per uur
tijdens vriezen	16 juni – 1 november	hellingmeter	24 x;
		automatische metingen	1 keer per uur
tijdens ontdooien grond	2 november – 13 maart	hellingmeter	6 x tot 20 nov.:
		automatische metingen	1 x per uur; daarna 1 x per 4 uur



Figuur 6.5 Situatie bij DV2 van vrieslansen en F100 monitoringapparatuur; verticale oost-west doorsnede. Voor nadere specificaties van de gebruikte instrumentcoderingen zie Bijlage D in Deel 2.

6.8. GRONDSPANNINGEN

De grondspanningen worden gemeten met de spade cellen en stress monitoring stations. Spade cellen zijn 1D en de stress monitoring stations 3D spanningsopnemers (Figuur 6.6 en 3.7). Deze spade cellen zijn gebouwd met twee tegen elkaar liggende stalen platen. De holle tussenliggende ruimte tussen de platen is gevuld met olie en de spade cel fungeert als een drukdoos.

In totaal zijn er per dwarsverbinding 4 spade cellen en 2 stress monitoring stations geïnstalleerd; respectievelijk SC1-SC8 en SM1, SM2b, SM3 en SM4.

Tijdens de installatie van SM2 is ten gevolge van een kleiprop de bekabeling kapot getrokken. SM2b is vervolgens in een nieuw boorgat geplaatst.



Figuur 6.6 links: Spade Cell; het ronde witte stipje is de waterspanningsmeter en in de witte rechthoek wordt de gronddruk gemeten.

Figuur 6.7 rechts: Stress Monitoring Station met 3D-metingen van gronddruk.

De spade cellen worden weggedrukt nadat eerst een gat tot een meter boven de installatiediepte is gepulst. De Stress Monitoring Stations worden in een gepulst gat uitgericht. Beide methoden hebben specifieke kenmerken die terug te vinden zijn in de nulmetingen. Bij de spade cellen kunnen hoge horizontale grondspanningen gemeten worden doordat de grond door de grondverdringing rond de spade cellen wordt opgespannen.

De installatie van de Stress Monitoring Stations brengt juist een ontspanning van de omringende grond teweeg. Bovendien heeft de aangevulde grond een lagere effectieve spanning op die diepte door een lagere verdichtingsgraad. De nulmetingen van beide instrumenten zijn daarom niet representatief voor de oorspronkelijke grondspanningen, zowel verticaal als horizontaal. De te verwachten verticale en horizontale grondspanningen zijn aangegeven in par. 6.14.

Om de hierboven beschreven redenen zijn voor de evaluatie van de spanningen alleen de relatieve metingen een maat voor de optredende vries- en dooi-invloeden. Met de relatieve metingen worden de metingen ten opzichte van de nulmeting bedoeld.

De relatie tussen de verschillende opnemers is voornamelijk afhankelijk van de locatie en de plaatselijke temperatuur. Zo moeten bij dwarsverbinding DV1 SC1, SC4, SM1 en SM2b met elkaar corresponderen voor wat betreft de spanningen in oost-west richting. SC2 en SC3 idem, echter vanwege de specifieke locatie aan de binnenzijde van de vrieslansen reageert de grond anders. Alle andere opnemers liggen aan de buitenzijde van de vrieslansen. SM1 en SM2 voor wat betreft de verticale spanningen, en horizontale spanningen richting de dwarsverbinding.

Met name door de verschillende installatiemethoden zijn de grondspanningen van de Stress Monitoring Stations niet van dezelfde grootte als bij de spade cellen. Wel moeten de curven dezelfde variaties in grondspanningen vertonen.

6.9. WATERSPANNINGEN

Alle Spade Cellen en de Stress Monitoring Stations zijn geïnstalleerd met waterspanningsmeters. Daarnaast zijn nog extra waterspanningsmeters aangebracht, de zogenaamde Vibrating Wire waterspanningsmeters.

Bij deze waterspanningsmeters bevindt zich voor het membraam van de meetsensor een kamer en filter om de de waterdruk te scheiden van de totaal druk (waterdruk en korreldruk). Voor plaatsing is de kamer en het filter geheel gevuld met een siliconenolie met een vriespunt van circa -68°C . Uit de metingen is gebleken dat dergelijke lage temperaturen niet optreden.

Bij het bevriezen van dit type waterspanningsmeters spelen de volgende effecten een rol:

De (trillende snaar) meetsensor is van zichzelf temperatuurafhankelijk. De leverancier bepaalt deze temperatuurafhankelijkheid per sensor en legt dit vast in een kalibratierapport. In de waterspanningsmeter is ook een temperatuursensor aangebracht zodat het mogelijk is voor het temperatuurgedrag van de meetsensor te corrigeren.

Het temperatuurgedrag van de totale waterspanningsmeter is in lucht vooraf in een klimaatruimte van GeoDelft onderzocht. Het bleek dat het instrument zich onder laboratoriumcondities nagegenoeg geheel temperatuuronafhankelijk gedroeg.

Op basis van het laboratoriumonderzoek mag dus worden verwacht dat het bevriezen van de grond rondom het instrument niet zal leiden tot vreemde afwijkingen in de meetresultaten, zolang het filter van het instrument niet geheel is ingesloten. Vanaf het moment dat alle grond rondom het instrument bevroren is, wordt de olie in het filter en de meetkamer ingesloten. Bij een verdere daling van de temperatuur zal de olie, maar ook de behuizing krimpen. Omdat de olie zich in feite in een gesloten omgeving bevindt, zal bij een gelijk blijvende vriesdruk de geregistreerde druk toenemen – indien de behuizing sterker krimpt dan de olie. Het omgekeerde geldt ook: als de olie sterker krimpt dan de behuizing wordt een afname van de druk gemeten.

Concluderend kan worden gesteld dat vanaf het moment dat de waterspanningsmeters zich in het bevroren grondmassief bevinden de metingen niet zonder meer betrouwbaar zijn. Dit geldt voor alle waterspanningsmeters die zijn toegepast in de SM stress monitoring stations, SC spade cellen en VW waterspanningsmeters. De gronddrukmetingen kennen dit probleem niet.

6.10. GRONDDEFORMATIES

De door het vries-, dooi- en bouwproces veroorzaakte gronddeformaties worden door extensometers en hellingmetingen in kaart gebracht. In totaal zijn er 2 extensometers en 2 hellingmeetbuizen per dwarsverbinding geïnstalleerd.

De extensometers geven de verticale deformatie aan en bestaan uit in de grond afgestelde packers met een stalen staaf met afschermingsmantel naar maaiveld. Met behulp van verplaatsingssensoren wordt via deze staaf de verplaatsing van het anker ten opzichte van het maaiveld gemeten. Om absolute verplaatsingen te kunnen meten zijn periodieke hoogtemetingen van de kop van de extensometer noodzakelijk. Per extensometer zijn 4 packers geïnstalleerd.

Het inmeten van de bovenkant van de extensometers is in opdracht van de aannemer uitgevoerd door een landmeetkundig bureau. Hierbij zijn echter problemen opgetreden met de referentiepunten, deze bleken te verlopen gedurende het vriesproces. Om deze reden worden de resultaten van de verticale deformatie metingen alleen gepresenteerd ten opzichte van maaiveld.

De hellingmeetbuizen geven de hoekvervorming (horizontale deformatie) aan. De metingen zijn gebaseerd op in de grond geplaatste buizen waarin een hellingmeter wordt neergelaten. Dit instrument bepaalt elke 0,5 meter in twee richtingen de schuinstand van de hellingmeetbuis ten opzichte van de verticaal. De deformaties worden bepaald door presentatie van de resultaten ten opzichte van de nulmetingen.

Tijdens de uitvoering van de hellingmetingen zijn in een aantal gevallen de metingen niet gelukt omdat de buizen waren dichtgevroren.

6.11. TEMPERATUREN

Alle Spade Cellen en Stress Monitoring Stations zijn geïnstalleerd met thermosensoren. Daarnaast zijn nog 6 extra thermosensoren en 2 temperatuur-lansen aangebracht respectievelijk, TE1-1 t/m TE1-6 en TE2-1 t/m TE2-6.

De temperatuurlansen T1 en T2 zijn beide door KMW vanuit de oostelijke hoofdtunnelbuis horizontaal in de grond geplaatst om de temperatuur van de grond te monitoren (Bijlage C2 en C3).

6.12. VERWERKING VAN DE METINGEN

Alle drukmetingen (water- en grondspanningen van SC, SM en VW) zijn van het type 'vibrating wire'. Dit betekent dat een frequentie wordt gemeten van een trillende snaar druksensor. Met behulp van een tweede graads polynoom wordt de frequentie door het meetapparaat omgerekend naar druk. Dit type druksensoren is voorzien van een temperatuursensor zodat een correctie kan worden uitgevoerd voor de verandering van de grondtemperatuur als gevolg van het vriesproces. Aangezien het absolute drukopnemers zijn is er ook gecorrigeerd voor variaties in de luchtdruk. Dit is gemeten met een barometer in het data-acquisitiesysteem.

Het temperatuurgedrag van dit type meetinstrumenten in lucht is vooraf in een klimaatruimte van GeoDelft onderzocht (zie installatierapport GeoDelft 2000). Hierbij is gebleken dat alle waterspanningsmeters en de horizontale cellen van de stress monitorings stations zich nagenoeg temperatuuronafhankelijk gedragen. De verticale cellen van de stress monitoring stations en de drukcellen van de spade cells vertonen een lineaire temperatuurafhankelijkheid tot circa 1 kPa per OC. Bij deze instrumenten is hiervoor een extra correctie uitgevoerd.

Uit de signalen van de extensometers EX wordt rechtstreeks de verplaatsing van het anker ten opzichte van maaiveld bepaald. Aan de hand van de temperatuursensoren TE is het temperatuurverloop bepaald over de staaf tussen maaiveld en anker van de extensometer nabij de dwarsverbinding. Uit berekeningen is vervolgens gebleken dat inkrimping of uitzetting van deze staaf, als gevolg van veranderingen in de gemeten grondtemperatuur, kleiner is dan de meetnauwkeurigheid van de verplaatsingssensor. Een correctie voor dit effect kon daarmee achterwege worden gelaten.

6.13. OVERZICHT OPNEMERS

In Bijlage D zijn alle coördinaten en de diepte van de opnemers van het meetprogramma F100-Metingen B opgenomen.

6.14. BEGINSITUATIES EN NULMETINGEN

In deze paragraaf worden de verwachte grondspanningen (waterspanningen en effectieve korrelspanningen), de nulmeting en de eindsituatie met elkaar vergeleken. De verwachte grondspanningen zijn berekend aan de hand van de respectievelijke volumegewichten van de bovenliggende grond en de theoretische hydrostatische waterspanning op de diepte waarop de opnemer zich bevindt.

De effectieve spanningen op het bevroren lichaam zijn conform de in de grond heersende spanningsverdeling tussen de horizontale en verticale spanning, de K_0 waarde. Deze waarde is afhankelijk van de hoek van inwendige wrijving van de grondsoort ter plekke en kan uitgedrukt worden in de volgende empirische relatie:

$$K_0 = 1 - \sin(\varphi)$$

waarin:

K_0 : neutrale gronddrukcoëfficiënt

Φ : wrijvingshoek

Bij de berekeningen van de grondspanningen bij DV1 is een K_0 waarde van 0,5 aangenomen. De verticale effectieve spanning (korrelspanning) is dan 2 maal zo groot als de horizontale effectieve spanning. Aangenomen is dat de grondwaterstandspiegel zich op NAP –0,63 m bevindt.

6.14.1. NULMETINGEN DV1

In tabel 6.5 staat een overzicht van de verwachte grondspanning, de nulmeting en de gemeten eindwaarde bij DV1.

De beginwaarden van de horizontale spanningen van de spade cellen komen zeer slecht overeen met verwachte (berekende) waarde. Dit betekent dat er met enige voorzichtigheid moet worden omgegaan met de absolute interpretatie van de grondspanningen van de spade cellen bij DV1. De oorzaak hiervan ligt zeer waarschijnlijk in het feit dat de spade cellen in de grond weggedrukt zijn tijdens de plaatsing. Enige voorspanning is dan het gevolg van de installatie van deze spade cellen.

Daarnaast geven de metingen van de spade cellen aan dat de grondspanningen na de vries-dooicyclus lager zijn geworden. Het is waarschijnlijk dat de spanningen van de beginsituatie gedistribueerd zijn door de vries-dooi cyclus.

De verwachte water- en grondspanningen van de stress monitoring stations benaderen elkaar wel significant. De grondspanningen van alle stress monitoring stations geven een kleine spanningsverhoging aan na de vries-dooi cyclus.

De waterspanningen voor en na de grondbevriezing bij DV1 zijn nagenoeg hetzelfde. Vanwege de hoge waterdoorlatendheid en de hydrostatische situatie in de waterkolom zijn de metingen bij DV1 volgens de verwachting (tabel 6.5).

Tabel 6.5 Metingen van grondspanningen ter plaatse van de opnemers bij DV1. De meest rechtse kolom is het verschil tussen de nulmeting en de gemeten eindwaarde na de vries-dooi cyclus.

Instrument	Diepte m t.o.v. mv	verwachte nulmeting	nulmeting	verschil	gemeten eindwaarde	gemeten verschil
		[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]
grondspanningen						
SC1-1	-17	156	321	165	228	-92
SC2-1	-17	156	-74	-230	-66	8
SC3-1	-17	153	190	37	195	4
SC4-1	-17	153	239	86	202	-37
SM1-1 verticaal	-18	313	222	-91	279	57
SM1-2 // dv	-17	155	177	22	184	7
SM1-3 ⊥ dv	-17	152	180	27	188	8
SM2b-1 verticaal	-17	309	204	-105	297	93
SM2b-2 // dv	-17	153	175	22	208	32
SM2b-3 ⊥ dv	-17	151	170	19	177	6
Waterspanningen						
SC1-2	-17	167	167	0	168	1
SC2-2	-17	167	167	0	169	3
SC3-2	-17	164	164	0	165	2
SC4-2	-17	164	168	4	168	0
SM1-4	-17	168	172	4	172	-1
SM2b-4	-17	166	167	1	166	-1
VW1-1	-14	131	136	5	138	3
VW1-2	-11	101	105	4	106	1

6.14.2. NULMETINGEN DV2

In tabel 6.6 staan een overzicht van de verwachte grondspanning, de nulmeting en de gemeten eindwaarde.

De grondspanningen van de spade cellen geven ook bij DV2 hogere waarden aan dan de berekende waarden. Na de vries-dooicyclus zijn de spanningen zoals opgenomen door spade cellen lager geworden. Dit is te verklaren door de vermoedelijke overspanning in de klei die wordt veroorzaakt door de installatie van de spade cellen, die in de grond worden gedrukt. Vergelijking van de waarden van stress monitoring stations geven wel een betrouwbaar beeld.

Na de vries-dooi cyclus wordt een lichte toename van de grondspanning en de wateroverspanning gemeten door de stress monitoring stations (tabel 6.6).

Tabel 6.6 Metingen van grondspanningen ter plaatse van de opnemers bij DV2. De rechter kolom is het verschil tussen de nulmeting en de gemeten eindwaarde na de vries-dooi cyclus.

instrument	Diepte m t.o.v. mv	verwachte nulmeting	nulmeting	verschil	gemeten eindwaarde	gemeten verschil
		[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]
grondspanningen						
SC5-1	-29	305	685	381	436	-249
SC6-1	-29	310	520	210	359	-161
SC7-1	-28	302	582	280	398	-184
SC8-1	-28	302	771	469	494	-277
SM3-1 verticaal	-29	612	-	-	-	-
SM3-2 // dv	-29	305	277	-28	340	63
SM3-3 ⊥ dv	-28	302	266	-36	327	61
SM4-1 verticaal	-29	607	310	-297	339	29
SM4-2 // dv	-28	299	289	-10	327	37
SM4-3 ⊥ dv	-28	296	291	-5	288	-3
waterspanningen						
SC5-2	-29	279	314	35	241	35
SC6-2	-29	284	283	-1	246	-1
SC7-2	-28	276	287	11	236	11
SC8-2	-28	276	333	57	241	57
SM3-4	-29	281	256	-25	231	-25
SM4-4	-28	278	279	1	243	1
VW3-1	-28	272	272	0		0
VW3-2	-25	242	257	15	208	15
VW3-3	-22	212	210	-2	210	-2
VW4-1	-26	256	273	17	208	17
VW4-2	-23	226	237	11	210	11

6.15. BEPROEVING KERNEN SPIJTBETON

Na het aanbrengen van het spuitbeton in de dwarsverbinding zijn door de aannemer kernen geboord. Deze kernen zijn beproefd om de sterkte van het beton te onderzoeken. Voor de bepaling van de druksterkte zijn de boorkernen conform NEN 3880, afgekort en plan-parallel gevlaakt op een diamantvlakbank tot een hoogte die gelijk is aan de diameter (96 mm). Vervolgens is conform NEN 5968 de druksterkte bij bezwijken bepaald. Voorafgaand aan de beproeving zijn de cilinders 48 uur onder water bewaard. De volumieke massa is door weging conform NEN 5967 bepaald.

Uit de testresultaten op het spuitbeton uit DV1 (zie Tabel 6.7) blijkt dat de gemiddelde druksterkte 30,5 N/mm² en de gemiddelde volumieke massa 2265,5 kg/m³ bedraagt.

Uit de testresultaten op het spuitbeton uit DV2 (zie Tabel 6.8) blijkt dat de gemiddelde druksterkte 29,2 N/mm² en de gemiddelde volumieke massa 2338,1 kg/m³ bedraagt.

Tabel 6.7 Resultaten beproeving spuitbeton dwarsverbinding 1.

opmerkingen	positie kern vertical in de dwars- verbinding	positie kern horizontaal t.o.v. hart DV (m)	datum drukproef	datum monster-name	volumieke massa (kg/m ³)	druksterkte (N/mm ²)	hoogte (mm)	kern nr.
wapening in gedrukt proefstuk	onderkant	4 West	101000	130900	2389	36,4	40	1a
	onderkant	4 West	101000	130900	2282	31,0	40	1b
	onderkant	4 West	101000	130900	2271	24,0	40	1c
wapening in gedrukt proefstuk	onderkant	o	101000	130900	2337	32,1	40	2a
wapening in gedrukt proefstuk	onderkant	o	101000	130900	2387	30,8	40	2b
	onderkant	o	101000	130900	2309	23,3	40	2c
	onderkant	4 Oost	101000	130900	2336	32,7	40	3a
wapening in gedrukt proefstuk	onderkant	4 Oost	101000	130900	2426	27,9	40	3b
	onderkant	4 Oost	101000	130900	2306	24,6	40	3c

Tabel 6.8 Resultaten beproeving spuitbeton dwarsverbinding 2.

opmerkingen	positie kern vertical in de dwars- verbinding	positie kern horizontaal t.o.v. hart DV (m)	datum drukproef	datum monstername	volumieke massa (kg/m ³)	druksterkte (N/mm ²)	hoogte (mm)	kern nr.
1 en 2 zelfde gat	onderkant	3.5 West	040800	260700	2258	29,1	40	1
1 en 2 zelfde gat	onderkant	3.5 West	040800	260700	2306	43,6	40	2
1 en 2 zelfde gat	onderkant	3.5 West	040800	260700	2306	44,7	40	2
3 en 4 zelfde gat	onderkant	0.5 West	040800	260700	2222	20,9	40	3
3 en 4 zelfde gat	onderkant	0.5 West	040800	260700	2320	32,4	40	4
5 en 6 zelfde gat	onderkant	3.7 Oost	040800	260700	2227	29,2	40	5
wapening in gedrukt proefstuk	onderkant	3.7 Oost	040800	260700	2261	11,1	40	6
	zijkant noord	2.0 West	040800	140700	2232	33,9	96	B1
wapening in gedrukt proefstuk	zijkant zuid	2.0 West	040800	140700	2298	30,4	96	B2

In voorgaande paragrafen is per instrumenttype aangegeven hoe de instrumenten functioneren onder de omstandigheden gedurende het vries- en dooiproces. Tevens is aangegeven wat de consequenties zijn voor het interpreteren van de metingen. In het algemeen zijn er geen onverwachte problemen opgetreden. Ook de uitval van instrumenten tijdens de gehele meetperiode is bijzonder laag (ca. 2 %). In het navolgende worden drie aspecten beschreven van onverwachte gebeurtenissen.

Maaivelddeformatie

De monitoring van maaivelddeformatie gedurende grondbevriezing is zowel bij DV1 als bij DV2 niet naar wens verlopen. Voor de bepaling van de maaiveldzetting is gekozen voor enkele punten op enige afstand van de dwarsverbindingen die werden gekoppeld aan NAP-bakens. Het meetplan schreef deze methode voor in combinatie met een meetonnauwkeurigheid van 0,5 mm. Bij nader inzien bleek dat landmeetkundig slechts een meetonnauwkeurigheid mogelijk is van 5 mm. Hierbij wordt opgemerkt dat de NAP-bakens al niet aan de gestelde eis van 0,1 mm voldoen. Deze meetmethode is gekozen, omdat vastpuntconussen duurder waren dan de beschreven meetmethode. Aan het einde van het project bleek dat ook tijdelijke vastpuntconussen geplaatst konden worden die beduidend goedkoper waren dan de eerder beschouwde niet-tijdelijke vastpuntconussen.

Hieruit zijn twee aanbevelingen geformuleerd:

1. Het is organisatorisch onverstandig gebleken een meetplan voor landmeetkundige metingen te laten opstellen door een partij zonder landmeetkundige expertise. Eisen ten aanzien van de nauwkeurigheid van de metingen moeten vooraf op realiteit worden beoordeeld en bij een opdracht aan de metende partij duidelijk als eis naar voren worden gebracht.
2. Het is beter bij toekomstige projecten gebruik te maken van meerdere referentiepunten per meetlokatie die zijn gefundeerd op diepere deformatievrije grondlagen met behulp van (tijdelijke) vastpuntconussen. Hiermee wordt het risico van beïnvloeding door externe factoren sterk verminderd.

Waterspanningmetingen

Gedurende de periode dat de temperatuur van de grond 0 °C of minder bedraagt is twijfel ontstaan over de werking van de waterspanningsmeters. Bij DV1(zand) vertoont het meetinstrument een ander gedrag dan bij DV2 (klei). Deze metingen worden in de volgende hoofdstukken besproken. De meters zijn in lucht getest voor temperaturen onder nul. De reden voor de test in koude lucht is dat gecorrigeerd kan worden voor temperatuursgevoeligheden. Echter, als een waterfilm het meetinstrument zou afsluiten kan het volgende geschieden: vanaf het moment dat alle grond rondom het instrument bevroren is, kan de olie in het filter en de meetkamer ingesloten worden. Bij een verdere daling van de temperatuur krimpen zowel de olie als de behuizing. Omdat de olie zich in feite in een gesloten omgeving bevindt, zal bij een gelijk blijvende vriesdruk de geregistreeerde druk toenemen - indien de behuizing sterker krimpt dan de olie.

Er is geen test uitgevoerd in ijs of bevroren grond. Het is daarom niet bekend of de afname van de gemeten waterdrukken veroorzaakt wordt door verlaging van de waterdruk of door het feit dat bij de vriestemperaturen geen waterdruk gemeten kan worden. Concluderend kan worden gesteld dat vanaf het moment dat de waterspanningsmeters zich in het bevroren grondmassief bevinden de metingen niet zonder meer betrouwbaar zijn. Dit geldt voor alle waterspanningsmeters die zijn toegepast in de SM stress monitoring stations, SC spade cellen en VW waterspanningsmeters. In het vervolg is het verstandig waterdrukmeters te testen met water dat bevroren wordt. Het lijkt erop dat de gronddrukmetingen dit probleem niet kennen, maar dit is niet onderzocht.

Bevroren hellingmeetbuizen

Tijdens de metingen zijn ook hellingen gemeten met hellingmeetbuizen. Na verloop van tijd bleken bij deze buizen inwendig ijsafzettingen te ontstaan, zodat de hellingmeter onvoldoende kon worden geleid. Extra inspanningen zijn gepleegd om deze buizen ijsvrij te maken. In het vervolg zal in bevroren grond sterk rekening gehouden moeten worden met dit fenomeen.

6.17. SAMENVATTING

Bij DV₁ en DV₂ zijn in de grond een serie instrumenten geplaatst: extensometers (EX), hellingmeetbuis/inclinometers (HE), spade cellen (SC), stress monitoring stations (SM), temperatuurmeters (TE), waterspanningmeting (VW) en temperatuurmeters (T).

Bij de spade cellen is geconstateerd dat de absolute meetwaarde slecht overeenkomt met de berekende grondspanning.

Vibrating wire waterspanningsmeters zijn niet betrouwbaar voor het meten van waterspanningen in bevroren grond (bij temperaturen beneden de 0 °C).

7. EVALUATIE DV1

Alle bij de evaluatie van DV1 behorende grafieken zijn in Bijlagen Meetgegevens verwerkt. Overzichtslijsten van deze grafieken staan per dwarsverbinding in de inhoudsopgave vermeld.

De grafieken en plots met meetgegevens bij DV1 staan opgenomen in Bijlage E t/m J.

7.1. TRAJECTEN IN HET VRIES- EN DOOIPROCES

Doordat grondspanningen, waterspanningen, deformaties en temperaturen sterk afhankelijk zijn van het bouwproces van de dwarsverbinding en het temperatuurverloop van de vriesinstallatie, is de gehele meetperiode ingedeeld in vijf fasen. Deze trajecten zijn bepaald aan de hand van het door de aannemer gemaakte logboek en het temperatuurverloop van de vriesinstallatie.

De vijf fasen staan in iedere grafiek van de meetseries (zie Bijlage E t/m H) weergegeven (voor toelichting zie par. 6.3):

1. vriezen (tot aan ontgraven)
2. vriezen-ontgraven
3. vriezen-bekleden
4. vriezen op lagere capaciteit
5. dooien

De fasen 1 tot en met 4 zijn in de grafieken aangegeven door horizontale balken met verticale loodlijnen op de x-as. Fase 5 (dooien) gaat in vanaf het moment dat de vriesinstallatie wordt uitgezet en loopt door tot het einde van de meetperiode.

Tevens zijn in de grafieken enkele belangrijke gebeurtenissen aangegeven die van invloed zijn op de metingen. Dit zijn:

- ontluichten van de ringleiding, aangegeven als 'ontluichten';
- ontwatering vanuit het hart van de dwarsverbinding, aangegeven als 'ontwateren'.

Daarnaast is het moment aangegeven waarop de temperatuur van de bij het betreffende meetinstrument behorende thermosensor gelijk is aan $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, aangegeven als ' $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ '.

In volgorde van de betreffende trajecten zullen de grondspanningen en waterspanningen behandeld worden versus temperatuur en tijd. In een later stadium zullen aan de hand van diezelfde trajecten de horizontale en verticale deformaties worden beschreven. Eerst worden het temperatuurverloop (meetinstrumenten, temperatuurlansen, buitenlucht en vriesinstallatie) en het verloop van de spanning besproken.

7.2. TEMPERATUURVERLOOP

In deze paragraaf wordt verwezen naar de grafieken van de volgende bijlagen:

Bijlage

- E1 “Vriesinstallatie DV1 » Temperaturen”
 - E2 “Temperatuurmeetlans 1 (T1) » Temperaturen”
 - E3 “Temperatuurmeetlans 2 (T2) » Temperaturen”
 - E4 “Temperaturen van de tunnelsegmenten van de westbuis bij DV1 » Temperaturen”
 - E5 “Waterspanningsmeters 1 (VW1) en thermosensoren 1 (TE1) » Temperaturen”
 - E6 “Stress monitoring stations 1 en 2 (SM1 en SM2b) » Temperaturen”
 - E7 “Spade cellen 1 tot en met 4 (SC1, SC2, SC3 en SC4) » Temperaturen”
 - E8 “Data-acquisitiesysteem DV1 » Temperatuur”
-

7.2.1. ALGEMEEN

Vanaf het moment dat de vriesinstallatie gaat functioneren op 3 mei 2000 beginnen de temperaturen bij de meetinstrumenten te dalen (Bijlage E1 t/m E8). De snelheid waarmee de temperatuur daalt hangt af van de positie van de opnemer ten opzichte van de vrieslansen. Bijvoorbeeld SC2 en SC3 (Bijlage E7) liggen tussen de vrieslansen en laten zodoende een zeer snelle daling zien.

Latente warmte is de extra energie die nodig is om de fase-overgang van vloeibaar naar ijs te realiseren. Deze extra energie gaat ten koste van de temperatuurdaling. Daardoor zal theoretisch de temperatuur net onder het 0 °C punt minder snel dalen. De extra energie wordt verbruikt totdat al het water bevroren is. De minder snelle temperatuurdaling gaat door totdat het vrije water rondom het instrument is bevroren. In de metingen is hier echter zeer weinig van te zien. De meetinstrumenten die op korte afstand van de vrieslansen liggen vertonen een zeer geringe afname in de snelheid van temperatuurdaling, VW1-1 en TE1-1, SM1 en SM2b, SC1 tot en met SC4 (Bijlage E5, E6 en E7). Daarnaast kan het verloop van de temperatuur van de vriesinstallatie de reden zijn voor de zeer geringe afname in snelheid van temperatuurdaling (Bijlage E1). De vriesinstallatie geeft pas vanaf 26 mei zijn laagste vriestemperatuur. Temperatuurmeetlansen T1 en T2 vertonen dit beeld niet (Bijlage E2 en E3).

Vanaf 1 augustus gaat de vriesinstallatie op lagere capaciteit werken. Dit is direct waar te nemen in de metingen. Ook hier geldt dat de afstand van het meetinstrument tot de vrieslansen bepalend is voor de snelheid van de temperatuurtoename, maar het moment waarop dit gebeurt is voor alle instrumenten gelijk.

Op 7 september 2000 wordt de vriesinstallatie uitgezet. Vanaf dit moment is het interessant om de temperatuur van de beide spade cellen SC2 en SC3 te volgen (Bijlage E7). Deze stijgt veel sneller dan de temperatuur bij de overige opnemers. Dit is het gevolg van de locatie van deze opnemers. De omgevingsinvloeden op SC2 en SC3 zijn groter door de inmiddels volledig afgebouwde dwarsverbinding. Omdat ontgraving heeft plaatsgevonden, wordt het vrieslichaam ook van binnenuit opgewarmd. In Bijlage E7 is duidelijk een temperatuurverhoging van 1-2 °C waarneembaar.

7.2.2. EXTERNE INVLOEDEN

OVERZICHT

Invloeden die variaties in het temperatuurverloop van de meetinstrumenten veroorzaken zijn:

Invloed van de temperatuur van de buitenlucht, indien het meetinstrument vlak onder maaiveld ligt.

Invloed van de heersende temperatuur in de tunnelbuizen en tunnelsegmenten als het instrument dicht bij één van de tunnelbuizen ligt. De temperatuur in de tunnel is weer afhankelijk van de warmte-afgifte door aanwezige machines, het bouwproces en de temperatuur van de buitenlucht.

Variaties in de in- en uittredetemperatuur van de koelvloeistof in de vrieslansen als het instrument dicht bij één of meerdere vrieslansen ligt. Deze variaties kunnen veroorzaakt worden door storingen in de vriesinstallatie en luchtophopingen in de ringleiding.

Invloed van het bouwproces, zoals het ontwateren van het hart van de toekomstige dwarsverbinding, ontgraven van de grond, bekleden van de wanden en het aanbrengen van droogijs aan de binnenzijde van de tunnel.

INVLOED TEMPERATUUR BUITENLUCHT

Opnemer TE1-6 ligt het dichtst bij het maaiveld en de metingen verlopen ongeveer conform de gemeten buitentemperatuur (vergelijk bijlage E5 en E8). De buitentemperatuur wordt gemeten in het data-acquisitiesysteem op circa één meter boven maaiveld. De temperaturen in het data-acquisitiesysteem kunnen hoog oplopen doordat de zon erop schijnt. Daarom is een algemene trendlijn in de grafiek opgenomen.

INVLOED TEMPERATUUR TUNNELBUIZEN EN TUNNELSEGMENTEN

In de beginsituatie, wanneer de vriesinstallatie nog niet functioneert, wordt bij een groot aantal thermosensoren een temperatuurtoename gemeten (vergelijk bijlage E5-E7). Deze toenamen lopen conform de stijging van de temperatuur van de buitenlucht. De thermosensoren liggen echter te ver van het maaiveld vandaan, maar wel dicht genoeg tegen de tunnel aan om beïnvloed te kunnen worden. In (bijlage E5) is tevens te zien dat deze temperatuurtoename niet plaatsvindt bij thermosensoren VW1-1 en TE1-1 tot en met TE1-5. Deze sensoren liggen op te grote afstand van één van de tunnelbuizen en het maaiveld.

SM1 en SM2b liggen op nagenoeg dezelfde afstand van de vrieslansen, terwijl er een temperatuurverschil van ca. 10 °C is. SM2b ligt ten opzichte van SM1 dichter tegen de oostbuis aan. Dat verschil is in bijlage E6 duidelijk te zien. De temperatuur van SM2b ligt altijd boven die van SM1.

VARIATIES IN DE IN- EN UITTREDETEMPERATUUR KOELVLOEISTOF VRIESLANSSEN

Tijdens de uitvoering moest de ringleiding ontlucht worden. Het moment waarop dit gebeurt, is duidelijk te zien bij VW1-1 en TE1-1 wanneer een tijdelijke verhoging van ca. 3 °C optreedt bij TE1 (bijlage E5). Deze meetinstrumenten liggen dicht tegen de bovenste vrieslans aan. Deze lans had de meeste last van de luchtophoping. Even voorafgaand aan de ontluchting is door de luchtophoping en daardoor verhoogde temperatuur bij de meetinstrumenten tijdelijk waar te nemen.

Tussentijds zijn de nodige haperingen in de vriesinstallatie waar te nemen (bijlage E1). Behalve de ontluchting hebben deze geen noemenswaardige effecten gehad op de andere metingen.

INVLOED BOUWPROCES

Tijdens het ontwateren van het hart van de dwarsverbinding is gebleken dat het vrieslichaam rondom nog niet gesloten was of dat het vrieslichaam nog niet voldoende aangesloten was op de tunnelbuizen. Hierdoor is water van buiten het vrieslichaam in het hart van de toekomstige dwarsverbinding gekomen. Met als gevolg dat richting het hart een stroming van warmer water is ontstaan. Dit is duidelijk te zien bij spade cel SC3 (bijlage E7). Dit meetinstrument ligt dicht bij het hart van de toekomstige dwarsverbinding en aan de binnenzijde van de vrieslansen. Naar verwachting zou SC2, gezien de locatie, net zo moeten reageren als SC3. Dit is niet het geval. SC2 reageert slechts in zeer lichte mate. Een mogelijke oorzaak is een stroming van warmer water langs SC3 naar het hart van de dwarsverbinding. Ter plaatse van meetpunten J1 en J2 op de ring 3 (bijlage E4 en par. 7.5) wordt voor de periode van ontwateren een sterke temperatuurstoename gemeten rond 23 juni 2000. Dit kan geleid hebben tot ontdooiing van het vrieslichaam ter plaatse, met als gevolg dat warmer water langs de tunnelbuis in het hart van het vrieslichaam kan komen.

Door het openen van de deuren om toegang tot het vrieslichaam te krijgen en door de ontgraving zelf komt warme lucht vanuit de tunnel in het ontgraven gedeelte. Dit heeft tot gevolg dat het vrieslichaam van binnenuit verwarmd wordt. Dit uit zich in de vorm van een temperatuurstoename na ontgraving, bij VW1-1 en TE1-1 (bijlage E5), SM1, SM2b (bijlage E6), SC1 tot en met SC4 (bijlage E7) en T1B2 (bijlage E2). Hierbij moet wel opgemerkt worden dat de vriesinstallatie na ontgraven haperingen vertoont, leidend tot een temperatuurstoename (bijlage E1; 7/2/2000). Dit effect kan ook een rol spelen in de bovengenoemde temperatuurstoenames.

Het is maar de vraag of de temperatuurstoename aan de buitenzijde van de vrieslansen door opwarming van binnen uit is ontstaan. Het is mogelijk dat SC2 en SC3, omdat deze opnemers aan de binnenzijde liggen, door de ontgraving en door de hapering worden opgewarmd en dat de overige opnemers alleen door de hapering worden opgewarmd. Daarnaast is bij SC2 en SC3 een opvallende knik rond 20 juli te zien. De temperatuur gaat van een stijging abrupt over in een daling (bijlage E7). Een mogelijke derde oorzaak hiervan kan de hydratatiewarmte van het spuitbeton zijn. Tijdens het uitharden van het spuitbeton wordt warmte aan de omgeving afgestaan.

Dit gaat door totdat het beton volledig is uitgehard. Het vriezen gaat door, waardoor op het moment van de knik het vriezen weer de overhand neemt en voor een temperatuurafname zorgt.

7.2.3. BIJZONDERHEDEN

De laagst gemeten temperaturen van SC2 zijn lager dan die van de vriesinstallatie. SC2-1 heeft een minimum van circa $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ en SC2-2 een minimum van ca. $-42,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. De vriesinstallatie levert een maximale vriestemperatuur van $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$ (vergelijk bijlage E1 met E7). Een mogelijke verklaring hiervoor is niet gevonden.

7.3. SPANNINGSVERLOOP

7.3.1. STIJFHEID VAN DE GROND

Voor lineair-elastisch materiaal is het spanningsverloop afhankelijk van de stijfheid van de grond en de vervorming. De stijfheidmodulus E is globaal gezien direct gerelateerd aan het quotiënt van grondspanning en vervorming.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Bij externe spanningsverandering speelt hoofdzakelijk de vervorming een rol. Bij interne spanningsveranderingen verandert ook de stijfheid van de grond. Een cilindervormig vrieslichaam zal ten tijde van bevroering aangroeien en een met temperatuurafname gepaard gaande stijfheidtoename veroorzaken. De stijfheid van het bevroren grondlichaam is daardoor niet overal gelijk, maar afhankelijk van de temperatuur.

Dit betekent dat temperatuurverschillen leiden tot verandering van de elasticiteit van het bevroren grondmassief. Omdat de verlaging van temperatuur dan tot gevolg heeft dat het water weer in volume afneemt, zal dit betekenen dat er (voornamelijk in klei) spanningsveranderingen worden verwacht.

7.3.2. VERGELIJKING VAN SPANNINGSOPNEMERS ONDERLING

In deze paragraaf wordt verwezen naar de grafieken van de volgende bijlagen:

Bijlage

F8-a	“Vergelijk Stress monitoring station 1 en 2b en spade cel 1 (SC1) » Absolute grondspanning evenwijdig versus Datum”
F8-r	“Vergelijk Stress monitoring station 1 en 2b en spade cel 1 (SC1) » Relatieve grondspanning evenwijdig versus Datum”
F9-a	“Vergelijk Stress monitoring station 1 en 2b en spade cel 4 (SC4) » Absolute grondspanning loodrecht versus Datum”
F9-r	“Vergelijk Stress monitoring station 1 en 2b en spade cel 4 (SC4) » Relatieve grondspanning loodrecht versus Datum”

Tijdens de evaluatie worden de gemeten spanningen per opnemer vergeleken met een of meerdere opnemers op soortgelijke posities. Naar verwachting moeten opnemers die op dezelfde positie ten opzichte van het vrieslichaam liggen, dezelfde spanningsveranderingen meten. In tabel 7.1 staat de positie van het meetapparaat bij DV1 ten opzicht van het ijslichaam aangegeven.

De gemeten waarden bij SC2-1 en SC4-1 zijn uitzonderingen hierop (bijlage F9). De curve van SC2 komt niet overeen met de curve van SC3. Bovendien reageert deze opnemer minder dan de andere spade cellen. In het hoofdstuk over de beginsituaties en nulmetingen is al aangegeven dat de nulmeting erg laag is, nl. -74 kPa. De mogelijkheid bestaat dat tijdens het afdraaien van de bovenbuis de spade cel is verwrongen. Voor de kwantitatieve evaluatie van grondspanningen wordt opnemer SC2 verder genegeerd.

De curve van SC4-1 vertoont exact hetzelfde verloop als de gemeten horizontale spanningen in de richting van het vrieslichaam, zoals die gemeten zijn bij SM1-3 en SM2b-3. Het vermoeden bestaat dat SC4-1 tijdens de installatie 90 graden gedraaid is. SC4-1 zou normaal gesproken dezelfde spanningsveranderingen moeten meten als SC1-1. In vervolg wordt SC4-1 vergeleken met SM1-3 en SM2b-3.

Tabel 7.1 Vergelijking van gemeten spanningen ten opzichte van de positie van de opnemers

		evenwijdig aan het vrieslichaam	loodrecht op het vrieslichaam	verticaal
buitenzijde vrieslansen		SC1-1 SM1-2 SM2b-2	SC4-1 SM1-3 SM2b-3	SM1-1 SM2b-1
binnenzijde vrieslansen		SC2-1 SC3-1		

7.3.3. WATERSPANNINGEN

Over het algemeen worden bij DV1 geen grote waterspanningsveranderingen verwacht. Dit gebeurt ook niet, een uitzondering bij SC2 en SC3 daargelaten. Deze twee spade cellen bevinden zich aan de binnenzijde van de vrieslansen en de temperaturen ter plaatse worden zeer laag. Wat een waterspanningsmeter precies meet bij deze lage temperaturen is niet duidelijk. Bij een temperatuur van rond de -40 °C zal praktisch al het water bevroren zijn (bijlage F7 en G2).

Het is op basis van de huidige meetgegevens niet mogelijk een uitspraak te doen over de relatie tussen de gemeten waterdruk en de heersende lage temperatuur. Nader laboratoriumonderzoek van de waterspanningsmeters zou kunnen uitwijzen of bij dergelijke lage temperaturen zich geen ijslens voor en in het filter vormt. Als dit namelijk het geval is dan vormt de lens een barrière en worden spanningsveranderingen met de omgeving niet realistisch weergegeven. De mogelijkheid bestaat dat dan de krimpspanning van olie in het reservoir voor het spanningsmembraan wordt gemeten.

7.3.4. GRONDSPANNINGEN ALGEMEEN

In het navolgende wordt per traject in het vries- en dooiproces de spanningsverandering behandeld.

In deze paragraaf wordt verwezen naar de grafieken met meetseries van grondspanningen bij DV1:

Bijlage

F1-a	“Stress monitoring station 1 (SM1) » Absolute grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum”
F1-r	“Stress monitoring station 1 (SM1) » Relatieve grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum”
F2-a	“Stress monitoring station 2b (SM2b) » Absolute grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum”
F2-r	“Stress monitoring station 2b (SM2b) » Relatieve grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum”
F3-a	“Spade cel 1 (SC1) » Absolute grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum”
F3-b	“Spade cel 1 (SC1) » Relatieve grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum”
F4-a	“Spade cel 2 (SC2) » Absolute grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum”
F4-r	“Spade cel 2 (SC2) » Relatieve grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum”
F5-a	“Spade cel 3 (SC3) » Absolute grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum”
F5-r	“Spade cel 3 (SC3) » Relatieve grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum”
F6-a	“Spade cel 4 (SC4) » Absolute grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum”
F6-r	“Spade cel 4 (SC4) » Relatieve grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum”
F7-a	“Absolute waterspanningen SC1-SC4, SM1-SM2b en VW1”
F7-r	“Relatieve waterspanningen SC1-SC4, SM1-SM2b en VW1”
G2	“Waterspanningsmeter hart dwarsverbinding 1 » Absolute waterspanning versus Datum”

VRIEZEN

Voor het evalueren van het gemeten spanningsverloop wordt rekening gehouden met de positie van een opnemer. Daarvoor worden de volgende twee termen gebruikt:

externe spanning: door bevriezing optredende spanningsverandering in de omgeving van het vrieslichaam. De betreffende spanningsopnemer ligt buiten het vrieslichaam. Gemeten zijn:

- spanning evenwijdig aan het vrieslichaam
- spanning loodrecht op het vrieslichaam
- spanning verticaal
- waterspanning

interne spanning: door bevriezing optredende spanningsverandering in het vrieslichaam. De betreffende spanningsopnemer ligt in het vrieslichaam. Gemeten zijn:

- axiale spanning (in het vrieslichaam, evenwijdig aan de vrieslansen)
- radiale spanning (in het vrieslichaam, loodrecht op vrieslansen)
- verticale spanning (in het vrieslichaam, of ringspanning)
- waterspanning

EXTERNE SPANNINGSVERANDERINGEN

Bij SM1 en SM2b is in de periode vanaf vriezen tot het 0 °C punt duidelijk de externe spanningsafname gevolgd door een toename te zien (Bijlage F1 en F2). In de grafieken voor de spade cellen SC2 en SC3 is dit niet waar te nemen (Bijlage F3-F6).

De spanningsafname bij SM2b is kleiner dan bij SM1. SM2b-3 (loodrecht) meet zelfs geen spanningsafname. Dit kan het gevolg zijn van de installatiemethode of de ligging van SM2b ten opzichte van de oostbuis. De afkoeling bij SM2b verloopt minder snel dan bij SM1. Dit is in tegenstelling tot wat eerder gesteld is, namelijk dat naarmate de opnemer verder van het vorstfront ligt, de spanningsafname groter is. Waarschijnlijk heeft SM2b door zijn ligging ten opzichte van de oostbuis een ander spanningsregime.

In het begin van het vriestraject, voordat de temperatuur de 0 °C heeft bereikt, is bij een aantal opnemers duidelijk afname van de spanning gemeten. Alle opnemers, met uitzondering van SC2-1 en SC3-1, vertonen eerst een afname, gevolgd door een toename. Bepalend voor dit omslagpunt is de afstand van de opnemer tot het vrieslichaam. Externe spanningsafname door krimp en externe spanningstoename door uitzetting vinden gelijktijdig plaats. Ligt een opnemer op geruime afstand van het vrieslichaam dan zal de temperatuur ter plaatse langzaam dalen, waardoor grond en grondwater krimpen. De externe spanningstoename door uitzetting heeft de opnemer nog niet bereikt. Op het moment dat het vorstfront dichterbij het meetinstrument komt, neemt de spanning toe.

Niet bij alle opnemers wordt een externe spanningsafname gemeten. Spade cellen SC2-1 en SC3-1 ondervinden door hun ligging op zeer korte afstand van de vrieslansen misschien wel krimp, maar dat wordt direct gecompenseerd door de externe spanningstoename.

- *Externe spanningsafname*: door afkoeling van grond en grondwater tot 0 °C neemt de spanning van totale grond af. Krimp treedt op in alle richtingen, evenwijdig aan de dwarsverbinding, loodrecht op de dwarsverbinding en verticaal.
- Theoretisch krimpen bij afkoeling kwartskorrels en krimpt water tot aan +4 °C. Het gaat hier om zeer marginale volumeverkleining van vaste stof en zodoende marginale spanningsafname.
- *Externe spanningstoename*: rondom de vrieslansen ontstaat een vrieslichaam. Het vrieslichaam zet uit en veroorzaakt een radiale en axiale spanningstoename in de omgeving. Radiale uitzetting veroorzaakt een afname van de spanning buiten het vrieslichaam, met als gevolg een verticale spanningsafname.

INTERNE SPANNINGSVERANDERINGEN

Observaties

- Radiale interne spanning; SC4-1, SM1-3 en SM2b-3 (bijlage F1-r, F2-r en F6-r) meten allen conform de verwachting een radiale spanningstoename vanaf de aanvang van grondbevriezing (Tabel 7.2).
- Axiale interne spanning; SC1-1, SM1-2 en SM2b-2 (bijlage F1-r, F2-r en F3-r) meten een spanningstoename vanaf de aanvang van grondbevriezing.
- Interne ringspanning; zowel SM1-1 als SM2b-1 (bijlage F1-r en F2-r) meten een kleine toename in de ringspanning vanaf de aanvang van grondbevriezing.

Alle opnemers meten een spanningstoename met uitzondering van SM2b-1. SM2b-1 (Bijlage F2) meet tot de periode van ontgraving een algemene spanningsafname van de ringspanning. SM2b-1 meet in eerste instantie een geringe externe spanningstoename gevolgd door een afname vanaf een tijdstip iets voordat het 0 °C punt bereikt is tot het moment van ontgraven. De reden hiervoor is onduidelijk, maar kan te maken hebben met de positie of de manier van installeren van de opnemer.

In tabel 7.2 staan de relatieve spanningsveranderingen vanaf het minimum tot aan de periode van ontgraven.

Tabel 7.2 Relatieve spanningsveranderingen van de periode vriezen tot aan de periode van ontgraven. De spanningsveranderingen zijn afgerond op 5 kPa.

opnemer	richting	spanningsverandering [kPa]	bijlage
SC1-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	80	F3
SC2-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	50	F4
SC3-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	55	F5
SC4-1 grondspanning loodrecht	radiaal	90	F6
SM1-1 grondspanning verticaal	ring	15	F1
SM1-2 grondspanning evenwijdig	axiaal	35	idem
SM1-3 grondspanning loodrecht	radiaal	30	idem
SM2b-1 grondspanning verticaal	ring	-5	F2
SM2b-2 grondspanning evenwijdig	axiaal	35	idem
SM2b-3 grondspanning loodrecht	radiaal	35	idem

Toelichting

De spanningsopnemers liggen vanaf het moment dat de temperatuur onder de 0 °C komt, in een met uitwendige druk belast cilindervormig vrieslichaam. De cilinder wordt naarmate de temperatuur daalt dikker en stijver. Zolang nog niet al het water in het bevroren grondlichaam bevroren is blijven de *radiale, axiale en ring- spanningen* toenemen. Bovendien wordt op het cilindervormige grondlichaam een externe belasting uitgeoefend door de toenemende grootte van het vrieslichaam. Deze externe belasting heerst radiaal vanuit het onbevroren hart en vanaf de buitenzijde van het vrieslichaam en axiaal door tegendruk van de tunnelbuizen.

ONTWATERING

Observaties

- Radiale interne spanning; SC4-1, SM1-3 en SM2b-3 (bijlage F1-r, F2-r en F6-r) meten conform de verwachting allen een radiale spanningsafname. Radiale ontspanning door afname waterspanning vanuit het hart (Tabel 7.3).
- Axiale interne spanning; SM1-2 en SM2b-2 (bijlage F1-r en F2-r) meten een spanningstoename. SC1-1 (bijlage F3) meet echter geen verandering op het moment van ontwateren. Wel meet SC1-1 net voor het moment van ontwateren een geringe spanningsafname van rond de 5 kPa. De reden hiervoor is onbekend.

Aan de binnenzijde van de vrieslansen meet SC3-1 (bijlage F5-r) een spanningsafname in plaats van een spanningstoename zoals bij SM1-1 en SM2b-2. Deze afname is sterk gerelateerd aan de afname in de gemeten waterspanning bij deze opnemer en de stabilisatie van de temperatuur. Het is mogelijk dat het onbevroren water bij SC3-1 in verbinding staat met het onbevroren water in het hart van DV1. SC2-1 meet geen spanningsverandering maar wel een geringe afname van de waterspanning en temperatuur. Alhoewel de metingen van SC2 vanwege de vreemde nulmeting (-74 kPa) niet volledig betrouwbaar zijn, kan hieruit wel geconcludeerd worden dat ten tijde van ontwatering in axiale richting twee spanningsvelden op elkaar inwerken. Enerzijds de spanningstoename door toename van de resulterende belasting (door afname van het effectieve oppervlak) en anderzijds een spanningsafname aan de binnenzijde van de vrieslansen door een afname van de waterspanningen in het bevroren grondlichaam.

In SC3-1 en SC4-1 wordt de grondspanning in een andere richting gemeten, nl. in radiale richting. De ontwatering van het hart van het bevroren lichaam resulteert dan in een (verwachte) spanningverlaging.

- Interne ringspanning; zowel SM1-1 als SM2b-1 (bijlage F1-r en F2-r) meten conform de verwachting een toename in de ringspanningen.

In tabel 7.3 staan de relatieve spanningsveranderingen tijdens de periode van ontwatering. De waarden zijn gegeven voor de periode waarin het veiligheidsventiel open staat. Deze periode beslaat ongeveer 1 week (zie bijlage A en G2).

Tabel 7.3 Relatieve spanningsveranderingen, afgerond op 5 kPa, tijdens de periode van ontwatering.

opnemer	richting	spanningsverandering [kPa]	bijlage
SC1-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	0	F3
SC2-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	0	F4
SC3-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	-40	F5
SC4-1 grondspanning loodrecht	radiaal	-10	F6
SM1-1 grondspanning verticaal	ring	20	F1
SM1-2 grondspanning evenwijdig	axiaal	5	idem
SM1-3 grondspanning loodrecht	radiaal	-10	idem
SM2b-1 grondspanning verticaal	ring	15	F2
SM2b-2 grondspanning evenwijdig	axiaal	10	idem
SM2b-3 grondspanning loodrecht	radiaal	-15	idem

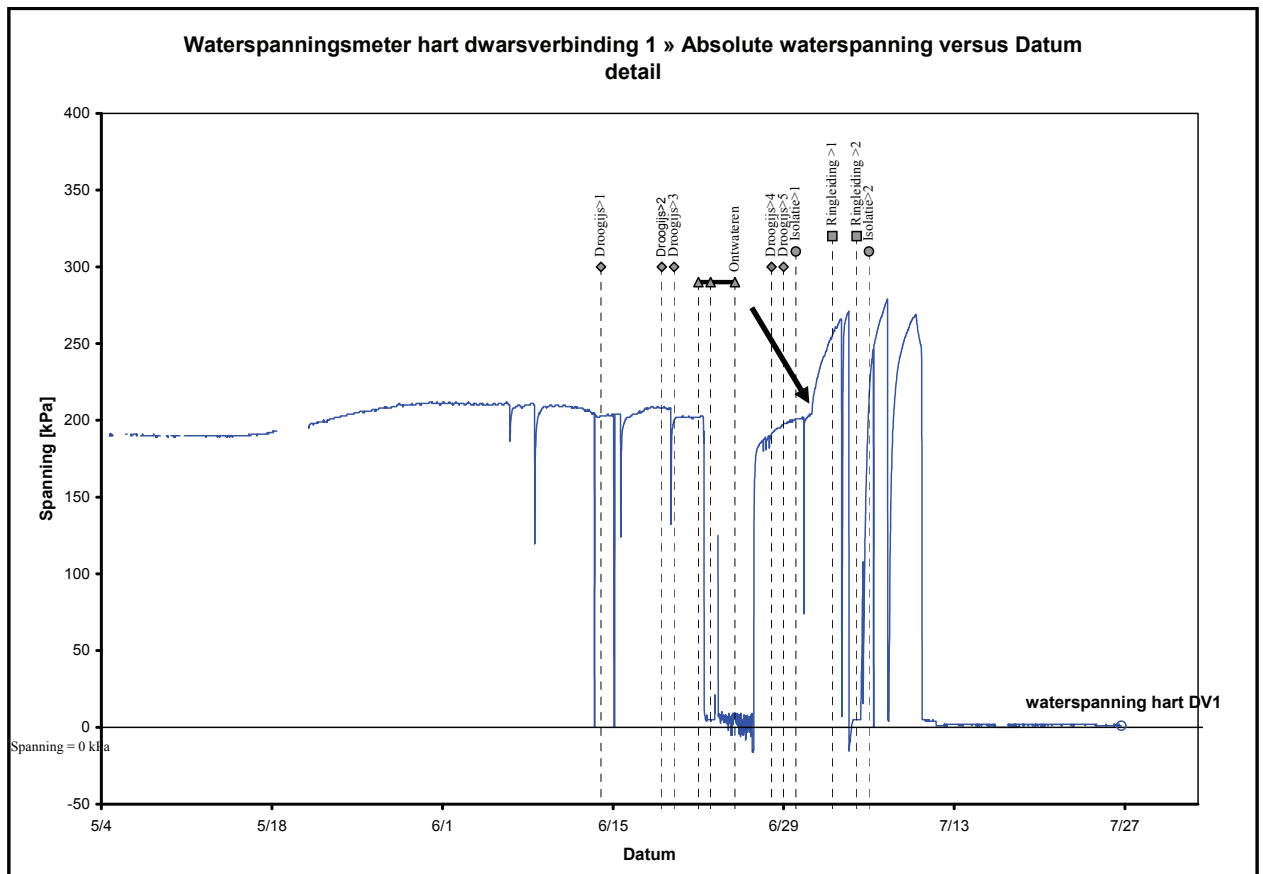
Toelichting

Tussentijds zijn gelijktijdig een aantal prominente pieken en dalen te zien (bijlage G2). Deze hangen samen met de ontwatering vanuit het hart van de dwarsverbinding. Om controle te hebben over de mate waarin het bevroren grondlichaam aansluit op de hoofdtunnelbuizen, is in het hart van de toekomstige dwarsverbinding een horizontale drain geïnstalleerd (bijlage G2). Theoretisch zou in het onbevroren hart van een gesloten vrieslichaam een wateroverspanning moeten heersen. Een te hoge wateroverspanning resulteert in een te hoge grondspanning in het hart van het vrieslichaam. De drain is zodoende om twee redenen aanwezig: (1) controle op wateroverspanning in het hart en (2) controle op sluiting van het vrieslichaam.

Als het vrieslichaam gesloten is en water wordt afgetapt moet de waterspanning dalen van wateroverspanning tot 0 kPa, door de open verbinding met de buitenlucht via de tunnelbuis. Bij de eerste ontwatering van DV1 bleef het water stromen en was geen sprake van een wateroverspanning. Dat heeft de aannemer doen vermoeden dat het vrieslichaam nog niet gesloten zou zijn. Om dat te controleren is de kraan een aantal keren open- en dichtgezet (periode ontwatering). De waterspanning nam af tot 0 kPa en steeg vervolgens geleidelijk tot het oorspronkelijke spanningsniveau (geen of geringe overspanning). De hoeveelheid afgetapt water was bovendien zeer groot, circa 26 m³. Dit correspondeerde niet met de mogelijke hoeveelheid water in een volume grond ter grootte van het nog niet bevroren hart van het vrieslichaam. Hieruit is geconcludeerd dat het vrieslichaam niet gesloten was (zie ook par. 7.7).

Voor en na de ontwateringsperiode heeft de aannemer een aantal malen getracht de westbuis af te koelen met droogijs (fig. 7.1). Door telkens de kraan van de drain open en dicht te draaien is te meten of het gat al gesloten is. In de grafiek zijn deze handelingen te zien in de vorm van snelle dalingen gevolgd door stijgingen in de waterspanning. Daarnaast is door middel van isolatiemateriaal een deel van de oostbuis en de ringleiding bekleed. Uiteindelijk liep, op 1 juli 2000, na sluiting van het veiligheidsventiel, de waterspanning weer op tot een significante wateroverspanning. Dit werd geïnterpreteerd als de sluiting van het gat in het ijslichaam, zodat met de ontgraving begonnen kon worden (zie pijl in fig. 7.1). Ook bleek dat bij het opendraaien van de kraan van de drain de toevloed van water stopte.

Door de ontwatering ontstaan interne spanningsveranderingen. Over het algemeen neemt de interne radiale spanning af terwijl de axiale en ringspanningen toenemen (tabel 7.3). Door ontspanning (aftappen van water) vanuit het hart van het vrieslichaam zal het vrieslichaam zelf van binnen uit radiaal ontspannen, met als gevolg een radiale interne spanningsafname. In axiale richting ontbreekt de ondersteuning in de totale axiale grondspanningen vanuit het onbevroren hart door afname van grondspanning in het hart. Het vrieslichaam moet de axiale spanning door het verlies van waterspanning vanuit het hart compenseren. In verticale richting zal door spanningsafname in radiale richting een spanningstoename ontstaan, de ringspanning neemt toe, het cilindervormige lichaam wordt meer belast. De resulterende axiale spanningen en de ringspanning worden daardoor groter.



Figuur 7.1 Meetgegevens van absolute waterspanning in het hart dwarsverbinding 2 en aanbrengen van isolatie.

De door de ontwatering verloren waterspanning in het hart van de dwarsverbinding moet worden gecompenseerd door de spanningstoename in tangentiële richting. Uit de grafiek (fig. 7.1) is af te lezen dat de waterspanning in het hart daalt met ca. 200 kPa. De ringspanning neemt toe met maximaal 20 kPa bij SM1-1 (bijlage F1). Daaruit blijkt dat het verlies aan grondspanning door het verlies aan waterspanning niet gelijkmatig over het gehele vrieslichaam wordt verdeeld. De stijvere delen van het vrieslichaam zullen meer spanning opnemen dan de minder stijve delen. SM1 en SM2 liggen aan de buitenzijde van het vrieslichaam en vallen zodoende in een minder stijf gedeelte. De spanningsveranderingen bij deze opnemers zijn daarom ook lager. De verandering in ringspanning in het vrieslichaam kan nooit groter zijn dan het spanningsverlies door ontwatering, waarbij natuurlijk rekening wordt gehouden met de afmetingen van de bevroren ring.

VRIEZEN-ONTGRAVEN

Observaties

- Radiale interne spanning; SC4-1, SM1-3 en SM2b-3 (bijlage F1-r, F2-r en F6-r) meten alle conform de verwachting een radiale spanningsafname (tabel 7.4).
- Axiale interne spanning; SC1-1, SM1-2 en SM2b-2 (bijlage F1-r, F2-r en F3-r) meten een spanningstoename. Aan de binnenzijde van de vrieslansen meet ook SC3-1 (bijlage F5-r) een spanningstoename, als compensatie voor het verlies aan axiale ondersteuning vanuit het hart van het vrieslichaam. Dit is niet conform wat gebeurt bij ontwatering.

De temperatuur blijft afnemen en de waterspanning neemt toe. Het is hoogst opmerkelijk dat tijdens de ontgraving de waterspanning bij SC3-2 toeneemt. Men zou verwachten dat tijdens ontgraving de waterspanning zou afnemen. Het is mogelijk dat zowel de spade cel als de waterspanningsmeter op dit temperatuurinterval bevriezen. SC2-1 meet nauwelijks een spanningsverandering. SC2-2 meet net als SC3-2 een toename in de waterspanning.

- Interne ringspanning; zowel SM1-1 als SM2b-1 (bijlage F1-r en F2-r) meten een toename in de ringspanning.

In tabel 7.4 staan de relatieve spanningsveranderingen vanaf het minimum tot aan de periode van ontgraven.

Toelichting

Op het moment dat de ontgraving begint, wordt van binnen uit een deel van het stijve vrieslichaam weggenomen. Uiteindelijk bleek ook het hart van DV1 nagenoeg geheel bevroren te zijn. Omdat hetzelfde fenomeen plaatsvindt als tijdens de ontwatering, namelijk het verwijderen van axiale en radiale ondersteuning, zijn de interne spanningsveranderingen relatief hetzelfde. In absolute betekenis zijn de spanningsveranderingen over het algemeen groter. De korrelspanning is immers ook weg.

Tabel 7.4 Relatieve spanningsveranderingen, afgerond op 5 kPa, tot aan de periode vriezen-ontgraven.

opnemer	richting	spanningsverandering [kPa]	bijlage
SC1-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	75	F3
SC2-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	0	F4
SC3-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	75	F5
SC4-1 grondspanning loodrecht	radiaal	-75	F6
SM1-1 grondspanning verticaal	ring	75	F1
SM1-2 grondspanning evenwijdig	axiaal	25	idem
SM1-3 grondspanning loodrecht	radiaal	-35	idem
SM2b-1 grondspanning verticaal	ring	65	F2
SM2b-2 grondspanning evenwijdig	axiaal	35	idem
SM2b-3 grondspanning loodrecht	radiaal	-35	idem

VRIEZEN-BEKLEDEN

Observaties

- Radiale interne spanning; vanaf de periode van bekleden is bij SM1-3, SM2b-3 en SC4-1 (bijlage F1-r, F2-r en F6-r) een interne spanningstoename gemeten. Het spuitbeton is inmiddels uitgehard en zorgt voor de radiale ondersteuning vanuit het hart. De radiale spanningsafname door ontgraving is daardoor beëindigd. Het proces van conventionele interne spanningstoename door grondbevriezing, zoals dat gemeten is in de periode tot aan ontgraven, gaat op normale wijze verder, echter op een lager beginniveau (tabel 7.5).

- Axiale interne spanning; bij SM1-2, SM2b-2 en SC1-1 (bijlage F1-r, F2-r en F3-r) wordt een spanningsafname gemeten. Door het aanbrengen van het spuitbeton ontstaat een geringe stijging van de temperatuur ter plaatse van deze opnemers, met een stijfheidsafname en daardoor spanningsafname als gevolg. Bovendien neemt het spuitbeton een deel van de axiale spanningen voor zijn rekening. Vervolgens daalt de temperatuur en wordt een lichte stijging van de axiale spanning gemeten. De lichte stijging is het gevolg van een conventionele interne spanningstoename door temperatuurafname.

Aan de binnenzijde van de vrieslansen meet SC3-1 (bijlage F5-r) eerst een spanningsafname. Eerst wordt in deze periode op het moment nadat is ontgraven en het spuitbeton is aangebracht, een temperatuurtoename gemeten. Het spuitbeton hardt uit en neemt een deel van de axiale spanningen voor zijn rekening. Omdat het vrieslichaam dat in contact staat met het spuitbeton in temperatuur stijgt, neemt ter plaatse de stijfheid af, met als gevolg een spanningsafname (stijfheidsafname). Vervolgens daalt de temperatuur en vindt conventionele interne spanningstoename plaats. SC2-1 meet nauwelijks een verandering.

- Ringspanning; in de periode na ontgraven stijgt de ringspanning bij SM1-1 en SM2b-1 (bijlage F1-r en F2-r) in geringe mate. In het hoofdstuk over het temperatuurverloop is al aangegeven dat rond deze periode zich haperingen en temperatuurtoenames in de vriesinstallatie voordoen. Op het moment dat de vrieslansen in temperatuur stijgen, reageert het vrieslichaam rondom de lansen met een spanningsafname. De ringspanningen reageren volgens de metingen zeer snel en extreem op elke niet-geleidelijke temperatuurverandering. Dit kan te wijten zijn aan de verdeling van de totale ringspanning over een stijf oppervlak. De stijfheid neemt afhankelijk van de temperatuur af. De stijfheid neemt zodoende af met de afstand tot de vrieslansen, in radiale zin. Op het moment dat plotseling de temperatuur ter plaatse van de vrieslansen hoger wordt, moeten de heersende ringspanningen verdeeld worden over het totale oppervlak. Dit heeft tot gevolg dat door zeer geringe temperatuurafname ter plaatse van de opnemer en daaraan gekoppeld een geringe stijfheidsafname toch een spanningsverhoging optreedt.

Nadat de lichte temperatuurtoename overgaat in een afname neemt de ringspanning af. Rondom de vrieslansen wordt weer stevig doorgevroren en de oorspronkelijke stijfheid komt weer op niveau. De ringspanning stabiliseert.

In tabel 7.5 staat de relatieve interne spanningsverandering aangegeven voor de periode ontgraven tot aan de periode vriezen op lagere capaciteit.

Tabel 7.5 Relatieve spanningsveranderingen, afgerond op 5 kPa, tot en met de periode vriezen-bekleden.

Opnemer	richting	spanningsverandering [kPa]	bijlage
SC1-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	-85 gevolgd door 10	F3
SC2-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	0	F4
SC3-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	-120 gevolgd door -5	F5
SC4-1 grondspanning loodrecht	radiaal	20	F6
SM1-1 grondspanning verticaal	ring	5 gevolgd door -20	F1
SM1-2 grondspanning evenwijdig	axiaal	-15	idem
SM1-3 grondspanning loodrecht	radiaal	15	idem
SM2b-1 grondspanning verticaal	ring	0 gevolgd door -20	F2
SM2b-2 grondspanning evenwijdig	axiaal	-15	idem
SM2b-3 grondspanning loodrecht	radiaal	10	idem

Toelichting

In deze periode wordt deels met maximale en deels met lagere vriescapaciteit gevoren. Ten tijde van het aanbrengen van het spuitbeton wordt nog met maximale capaciteit gevoren. Het aanbrengen van de wanden, vloer en plafond vindt plaats tijdens het vriezen met lagere capaciteit.

In dit hoofdstuk wordt voor de periode bekleden alleen de spanningsverandering beschreven tot aan de periode waarop het vriezen met lagere vriescapaciteit begint.

Het bekleden kenmerkt zich voor het gehele vrieslichaam door een periode van temperatuurstijging gevolgd door een temperatuardaling. Dit komt door de opwarming vanuit het inmiddels ontgraven hart van het vrieslichaam. Aan de binnenzijde van de vrieslansen stijgt de temperatuur sneller dan aan de buitenzijde. Het vriezen gaat door, met als gevolg dat uiteindelijk de temperatuur weer daalt.

In de periode van bekleden wordt eerst het spuitbeton aangebracht. Vanaf dit moment van aanbrengen en uitharden van het spuitbeton vormt zich een stijf betonlichaam binnen het stijve vrieslichaam. Dit betonlichaam vormt als het ware coaxiaal een stijve cilinder in het cilindervormige vrieslichaam. De binnenste cilinder, het spuitbeton, is relatief warm door de open verbinding met warme lucht vanuit de tunnel. Dit resulteert in een opwarming van het hart van het vrieslichaam. De stijfheid van het betonlichaam en de opwarming van binnenuit zorgen voor interne spanningsveranderingen. De stijfheid van het vrieslichaam neemt door opwarming af. De spanningen worden herverdeeld over het totale vrieslichaam. De stijvere delen nemen meer spanning op en de minder stijve delen nemen minder spanning op.

VRIEZEN OP LAGERE CAPACITEIT

Observaties

- Radiale interne spanning; vanaf deze periode meten SC4-1, SM1-3 en SM2b-3 (bijlage F1-r, F2-r en F6-r) een interne spanningsafname. De stijfheid van het bevroren grondlichaam wordt immers lager door de hogere temperatuur. SM1-3 meet in een later stadium binnen deze periode wel een geringe toename.

- Axiale interne spanning; bij SC1-1, SM1-2 en SM2b-2 (bijlage F1-r, F2-r en F3-r) wordt een spanningsafname gemeten. Net als bij de radiale interne spanningsafname reageren deze opnemers op een stijfheidsafname. Aan de binnenzijde van de vrieslansen meten ook SC2-1 en SC3-1 (bijlage F5-r) een spanningsafname.
- Ringspanning; SM1-1 en SM2b-1 (bijlage F1-r en F2-r) vertonen hetzelfde gedrag als tijdens de periode bekleden. Een temperatuuroptename veroorzaakt een stijfheidsafname. In eerste instantie begint de stijfheidsafname ter plaatse van de vrieslansen. Hierdoor worden de heersende grondspanningen abrupt verdeeld over het minder stijve oppervlak. Uiteindelijk neemt ook ter plaatse van de stressmonitoring stations de spanning af.

Het is opmerkelijk dat zowel SC1-1, SC3-1 als SC4-1 een spanningsafname meten tot onder de nulmeting. Dit heeft waarschijnlijk te maken met de verstoring van de natuurlijke grondspanning door de installatie van de spade cellen. De stress monitoring stations meten daarentegen geen spanningsveranderingen tot onder de nulmeting.

In tabel 7.6 staan de relatieve interne spanningsverandering aangegeven voor de periode ontgraven tot aan de periode vriezen op lagere capaciteit.

Toelichting

In deze periode wordt de dwarsverbinding afgebouwd, in de vorm van het aanbrengen van de betonnen bekleding. Vanaf dit moment gaat de vriesinstallatie op lagere capaciteit draaien en nemen zodoende de temperaturen in de omgeving toe. De belangrijkste verandering die hierbij ontstaat is de afname van de stijfheid van het bevroren grondlichaam. Door de abrupte temperatuuroptename kunnen net als bij de ringspanningen tijdens het bekleden abrupte spanningsveranderingen ontstaan zonder dat gepaard gaat met een grote deformatie of rek.

Tabel 7.6 Relatieve spanningsveranderingen, afgerond op 5 kPa, tot en met de periode vriezen op lagere capaciteit.

opnemer	richting	spanningsverandering [kPa]	bijlage
SC1-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	-125	F3
SC2-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	-15	F4
SC3-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	-70	F5
SC4-1 grondspanning loodrecht	radiaal	-70	F6
SM1-1 grondspanning verticaal	ring	50 gevolgd door -30	F1
SM1-2 grondspanning evenwijdig	axiaal	-25	idem
SM1-3 grondspanning loodrecht	radiaal	-10	idem
SM2b-1 grondspanning verticaal	ring	35 gevolgd door -10	F2
SM2b-2 grondspanning evenwijdig	axiaal	-25	idem
SM2b-3 grondspanning loodrecht	radiaal	-10	idem

DOOIEN

In deze periode wordt de vriesinstallatie uitgezet, met als gevolg een temperatuurstoename en een afname van de stijfheid van het gehele vrieslichaam. De spanningsveranderingen verlopen daardoor conform de temperatuurverhoging, op geleidelijk afnemende wijze.

Tevens worden de vrieslansen getrokken. Dit kan leiden tot spanningsveranderingen in de directe omgeving van de lansen. De gevolgen hier van zijn niet terug te vinden in de metingen.

In deze periode wordt over het algemeen in elke richting een interne afname van de spanning of stabilisatie verwacht. Behalve op het moment dat de installatie wordt uitgezet. Al eerder is geconstateerd dat een abrupte variatie in de temperatuur tot een abrupte herverdeling van de interne grondspanningen leidt. Daarna volgt een meer geleidelijke en normale interne spanningsverdeling.

- Radiale interne spanning; vanaf deze periode meten SM1-3, SM2b-3 en SC4-1 (bijlage F1-r, F2-r en F6-r) een interne spanningsstabilisatie. Opmerkelijk is direct na het uitzetten van de vriesinstallatie de zeer geringe fluctuatie in de gemeten waterspanningen. De gemeten grondspanningen vertonen ook deze fluctuatie. De uiteindelijke grondspanning bij de stressmonitoring stations ligt boven de nulmeting, terwijl die van de spade cell onder de nulmeting ligt. Dit kan te maken hebben met de verschillen in de installatie van de opnemers.
- Axiale interne spanning; Bij SM1-2, SM2b-2 en SC1-1 (bijlage F1-r, F2-r en F3-r) wordt een afname van de spanning dan wel stabilisatie gemeten. SC1-1 meet echter nog een flinke afname gevolgd door een toename. Deze afname bij SC1-1 is groter dan verwacht. De uiteindelijke grondspanning is veel lager dan de nulmeting. Het is onduidelijk waarom bij SC1-1 eerst een afname en vervolgens een toename gemeten wordt. De stress monitoring stations meten dit verschijnsel niet. Een mogelijke verklaring hiervoor is hier weer de methode van installatie. SC2-1 meet een stabilisatie van de interne grondspanning. SC3-1 (bijlage F5-r) meet juist een toename gevolgd door een stabilisatie. De reden voor een interne spanningstoename is onduidelijk. Hierin zit duidelijk een koppeling met de gemeten waterspanning bij deze opnemer. Hierop wordt in het hoofdstuk uitzonderingen teruggekomen.
- Ringspanning; SM1-1 (bijlage F1-r) meet in het begin een piekvormige spanningstoename. Dit is het gevolg van de herverdeling van spanningen door abrupte temperatuurveranderingen. Daarna meet deze opnemer conform de verwachting een stabilisatie. SM2b-1 (bijlage F2-r) daarentegen, meet weliswaar ook een piekvormige spanningsverandering, alleen neemt daarna de ringspanning in twee stappen toe. De eerste stap, tot aan het moment dat de temperatuur ter plaatse nog onder de 0 °C is, is onduidelijk. De tweede spanningstoename kan te maken hebben met een door grondbevriezing ontstane herverdeling van de korrels; consolidatie. Dit leidt tot verticale spanningsverhoging. De verticale spanning blijft hoger dan de beginsituatie en loopt zelfs nog op.

In tabel 7.7 staan de relatieve interne spanningsverandering aangegeven voor de periode ontgraven tot aan de periode vriezen op lagere capaciteit.

Tabel 7.7 Relatieve spanningsveranderingen, afgerond op 5 kPa, voor de periode tot en met dooien.

opnemer	richting	spanningsverandering [kPa]	bijlagen
SC1-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	-70 gevolgd door 35	F3
SC2-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	-30	F4
SC3-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	+85 gevolgd door -10	F5
SC4-1 grondspanning loodrecht	radiaal	0	F6
SM1-1 grondspanning verticaal	ring	15 gevolgd door -10	F1
SM1-2 grondspanning evenwijdig	axiaal	-10	idem
SM1-3 grondspanning loodrecht	radiaal	15 gevolgd door -5	idem
SM2b-1 grondspanning verticaal	ring	10 gevolgd door 10 en 35	F2
SM2b-2 grondspanning evenwijdig	axiaal	0	idem
SM2b-3 grondspanning loodrecht	radiaal	10	idem

7.3.5. WATERSPANNINGEN

Over het algemeen zijn de waterspanningen buiten het bevroren grondlichaam redelijk constant. Dit is conform de verwachting bij grondbevriezing van zand. Uitzonderingen hierop zijn SC2 en SC3 (bijlage F7). Deze twee opnemers vertonen grote waterspanningsvariaties. Deze opnemers liggen dicht tegen de dwarsverbinding, aan de binnenzijde van de vrieslansen, en ondervinden de laagste vriestemperaturen. Vanaf het moment van ontwatering begint de waterspanning van SC3 grote variaties te vertonen die in kwaliteit gelijk lopen met de gemeten grondspanningen bij deze opnemer. SC2 vertoont min of meer hetzelfde gedrag. Wat hier precies gebeurt is onduidelijk. Een mogelijke verklaring voor dit gedrag is het ontstaan van een ijslens voor het waterspanningsfilter. Op die manier wordt de waterspanningsmeter afgesloten en ontstaat een starre constructie. De waterspanningsmeter zou dan als grondspanningsmeter gaan functioneren. Op het moment dat de temperatuur stijgt en de lens minder stijf wordt gaat de opnemer weer als waterspanningsmeter functioneren. Dit gedrag is waar te nemen bij SC2 en SC3 (bijlage F4 en F5). Op het moment dat de temperatuur weer stijgt, stijgt ook de waterspanning weer tot oorspronkelijk niveau.

De waterspanningsmeters zijn gecalibreerd in een klimaatruimte. De calibratie is uitgevoerd van $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ tot $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. De meetgegevens zijn met behulp van deze calibratie gecorrigeerd. Het gedrag van de sensoren is dermate constant dat de correcties worden geëxtrapoleerd voor het geval dat de sensoren beneden de minimale calibratietemperatuur komen. Het temperatuurgedrag beneden de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ is niet gemeten. Op basis van de metingen wordt aangenomen dat de afwijkingen ten opzichte van de lineaire benadering klein zijn.

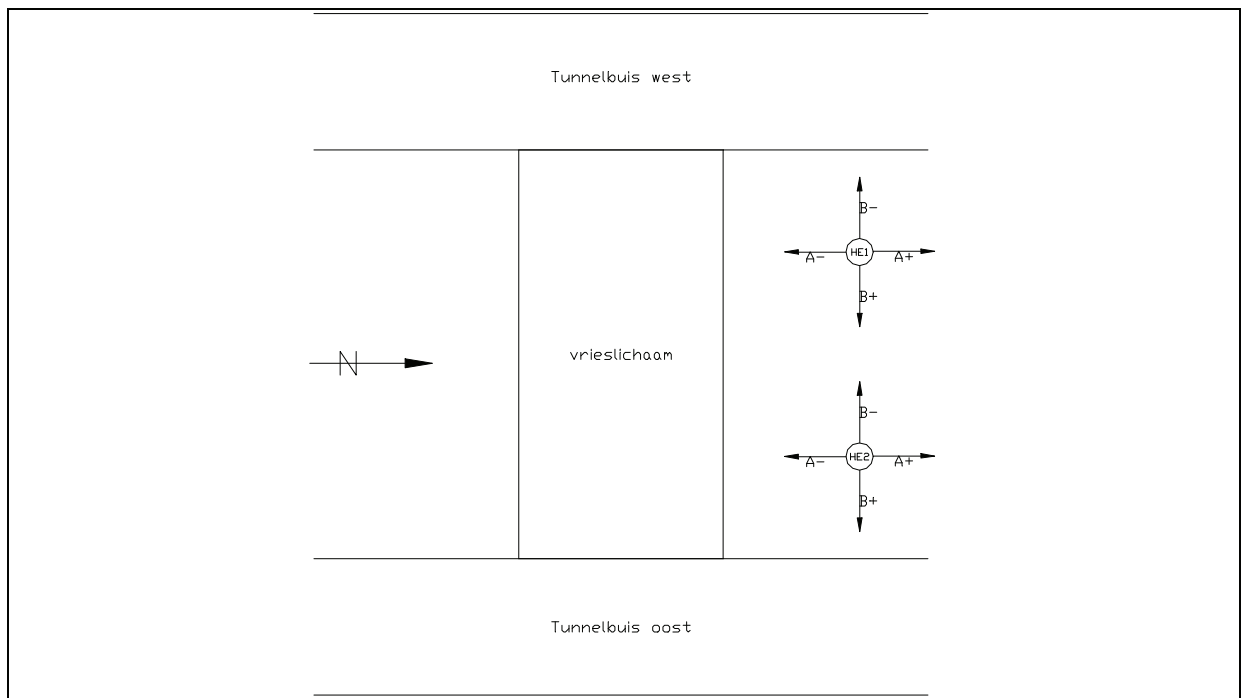
In een eventueel vervolgonderzoek zou het gedrag van een waterspanningsmeter in bevroren grond beter onderzocht moeten worden om een uitspraak te kunnen doen over wat werkelijk gemeten wordt bij lage temperaturen: waterspanning of grondspanning.

7.4. DEFORMATIE VAN DE GROND

Met hellingmeetbuizen en extensometers worden de horizontale en verticale deformaties van de grond (nabij het vrieslichaam) tijdens het vriezen en dooien gemeten. De extensometers meten de verticale deformatie aan de bovenkant van het vrieslichaam en de hellingmeetbuizen de horizontale deformatie aan de zijkant van het vrieslichaam. De hellingmetingen worden in twee richtingen gedaan, de A- en B-richting.

De A-richting is loodrecht op het vrieslichaam.

De B-richting is evenwijdig aan het vrieslichaam.



Figuur 7.2 Positie van HE1 en HE2 t.o.v. DV1.

De extensometers bevinden zich recht boven en in het vrieslichaam, op de hartlijn. Elke extensometer bestaat uit vier packers die afzonderlijk met het maaiveld verbonden zijn door middel van een stang. Op het maaiveld staan de opnemers die de verplaatsing van de stang registreren.

Bij DV1 worden, omdat in zand gevroren wordt, zeer geringe deformaties verwacht. De volumevergroting door bevrozing wordt grotendeels gecompenseerd door het uitdrijven van onbevroren water. Uit de metingen blijkt dat de gemiddelde maximale deformatie ter plaatse van EX1-1 en EX2-1, dat zijn de extenso-meterpackers die het dichtst tegen de vrieslansen aanliggen, respectievelijk 8 en 10 mm bedragen. De hellingmeting geeft een maximum van 4 mm.

Als het vrieslichaam uitzet, zet het zich af tegen de onderzijde van het vrieslichaam. De deformatie die aan de bovenkant van het vrieslichaam gemeten wordt (extensometer) geeft daarom een onderschatting van de totale radiale deformatie.

Bijlage

G1 “Waterspanningsmeters 1 (VW1) en thermosensoren 1 (TE1) » Temperaturen”

H1 “Extensometer 1 (EX1) » Absolute verticale deformatie versus Temperatuur en Datum”

H2 “Extensometer 2 (EX2) » Absolute verticale deformatie versus Temperatuur en Datum”

H3 “Hellingmeetbuis 1, A richting (HE1A) » Relatieve gronddeformatie op dieptes NAP –15 t/m –22 m versus Datum”

H4 “Hellingmeetbuis 1, B richting (HE1B) » Relatieve gronddeformatie op dieptes NAP –15 t/m –22 m versus Datum”

H5 “Hellingmeetbuis 2, A richting (HE2A) » Relatieve gronddeformatie op dieptes NAP –15 t/m –22 m versus Datum”

H6 “Hellingmeetbuis 2, B richting (HE2B) » Relatieve gronddeformatie op dieptes NAP –15 t/m –22 m versus Datum”

7.4.1. EXTENSOMETERS

De metingen van de extensometers worden uitgedrukt in een verkorting. De packers zijn alle afzonderlijk door middel van een stang verbonden met de opnemer. De opnemers staan op maaiveldniveau en registreren de lengte van de stang. Komen packer en opnemer dicht bij elkaar, dan impliceert dat een verkorting (verkorting is negatief).

Het gehele deformatiepatroon zoals dat te zien is bij de extensometers wordt gedomineerd door drie effecten: maaiveldzettingen, vorstheffing en ontgravingsdeformaties.

MAAIVELDZETTINGEN

Maaiveldzettingen zorgen voor een verkorting. De grond wordt samengedrukt en packer en opnemer komen dicht bij elkaar. Kenmerkend voor dit effect is dat de mate van deformatie voor alle packers ongeveer gelijk moet zijn omdat de packers niet afzonderlijk omhoogkomen, maar omdat de opnemers als geheel naar beneden komen.

In de grafieken van EX1 en EX2 (bijlage H1 en H2) is duidelijk te zien dat de deformaties al beginnen voordat gevoren wordt (bijlage H1). Dit is te wijten aan de extra overhoogte en grondverbetering die ter plaatse van DV1 is aangebracht. De overhoogte en grondverbetering zijn aangebracht om een goede werkplek te maken voor de monitoring.

Uit zettingsberekeningen is gebleken dat bij de originele grondopbouw ter plaatse van DV1 (met een overhoogte voor de aangebrachte grondverbetering van 0,3 m en een droog volume gewicht daarvan van 16 kN/m³) na 100 dagen een zetting optreedt van ca. 4 mm. Dit komt overeen met de gemeten einddeformaties. De berekeningsnauwkeurigheid ligt echter in de orde van een centimeter. Dat de berekende zetting en de gemeten zetting goed overeenkomen is mooi meegenomen, maar hier mag geen harde conclusie uit getrokken worden.

Naast de verticale relatieve deformaties tussen de packers en het maaiveld zijn tevens de verticale absolute deformaties van het maaiveld gemeten. Doordat de gekozen vaste punten voor het inmeten van de referentiepunten ter plaatse van de parkeerplaats niet zo vast waren als verwacht, worden deze metingen niet besproken in deze evaluatie.

Verder is in de metingen te zien, dat na de periode van vriezen de totale deformaties per packer stagneren en dat door maaiveldzettingen een blijvende deformatie is opgetreden (bijlage H1). Omdat maaiveldzettingen over het algemeen een voor elke packer gelijke deformatie moeten geven, is de blijvende deformatie niet slechts toe te schrijven aan maaiveldzettingen. Het verschil kan eventueel veroorzaakt zijn door consolidatie na bevroering en dooi.

VORSTHEFFING

De mate van vorstheffing is afhankelijk van de temperatuur (de afstanden tot het vrieslichaam) en geeft zodoende verschillende waarden voor de verschillende packers. Naarmate de packer dichterbij of in het vrieslichaam ligt worden de deformaties groter. Een packer hoeft diensgevolge niet in het vrieslichaam te liggen om een deformatie te meten. Het vrieslichaam zet immers uit en veroorzaakt daardoor ook een deformatie in de omringende onbevroren grond.

In het hoofdstuk over het spanningsverloop is aangegeven dat in de periode tot 0 °C krimp tezamen met opspanning door uitzetting plaatsvinden. Krimp zorgt voor een verlenging en uitzetting voor een verkorting. Bij de extensometers bestaat geen verschil tussen deformaties in het vrieslichaam of daarbuiten. De extensometers meten in de periode tussen $T = 0\text{ °C}$ en ontluichten (bijlage H1 en H2) enige fluctuaties in de verkorting. Wij kunnen deze fluctuaties niet met zekerheid toeschrijven aan krimpgedrag.

Wat betreft de vorstheffing meten EX1 en EX2 een toenemende deformatie naarmate de packer dichterbij of in het vrieslichaam ligt.

ONTGRAVINGSDEFORMATIE

Door ontgraving trekt het vrieslichaam samen. De packers en opnemers komen daardoor verder uit elkaar te liggen (bijlage H1 en H2). In de curven van EX1 en EX2 neemt de deformatie af op het moment dat de ontgraving begint. Door contractie van een cilindervormig vrieslichaam worden de vorstheffingen teniet gedaan. Het is duidelijk te zien dat de deformatie het meest afneemt bij de onderste extensometerpackers EX1-1 en EX2-1. De andere packers reageren in naar boven afnemende mate op de ontgraving.

Opmerkelijk en onverklaarbaar is de reactie van packer EX1-1 ten opzichte van de andere packers gedurende de dooi-periode (bijlage H1). De veel grotere deformatie door ontgraving van deze packer ten opzichte van EX1-2 impliceert een rek in de grond gedurende de dooifase. Ook opnemer EX2-1 meet een hogere resterende samendrukking gedurende de dooifase (bijlage H2).

7.4.2. HELLINGMEETBUIZEN

A-richting (⊥ vrieslansen)

Voor wat betreft de hellingmeetbuizen zijn er duidelijk deformaties waar te nemen (bijlage H3-H6). De orde grootte (maximaal 4 mm) komt overeen met de verwachting dat de verticale deformatie ter hoogte van het hart van het vrieslichaam maximaal is.

Omdat de meetnauwkeurigheid van de hellingmeetbuizen niet zo groot is als die van de extensometers zijn de bij de extensometer beschreven effecten niet duidelijk te onderscheiden bij de hellingmeetbuizen. Het is wel te zien dat de deformatie ter hoogte van de buitenste drie vrieslansen groter is dan de deformatie daartussen.

B-richting (// vrieslansen):

De deformaties in de B richting zijn zeer gering voor deze dwarsverbinding DV1. De gegevens in de bijlagen H3-H6 zijn gecorrigeerd voor horizontale verplaatsingen die aan het maaiveld optreden.

7.4.3. BIJZONDERHEDEN

Net voordat het vriezen begint is een verkortingsafname te zien. De orde grootte is voor alle packers ongeveer hetzelfde. Dit duidt op een verplaatsing die zich aan het maaiveld voordoet, ter plaatse van de opnemers. Wat hier precies gebeurd is onbekend. Zo zijn ook de twee verkortingstoename op het eind van het gehele vriesproces waargenomen.

De deformatie bij extensometerpackers 1 en 2 stagneert ten tijde van de waterafvoer vanuit het hart van de dwarsverbinding. Eerder is al beschreven hoe de spanningsopnemers hierop reageren. De radiale spanningen nemen af en een korte periode van contractie van het ijslichaam treedt in.

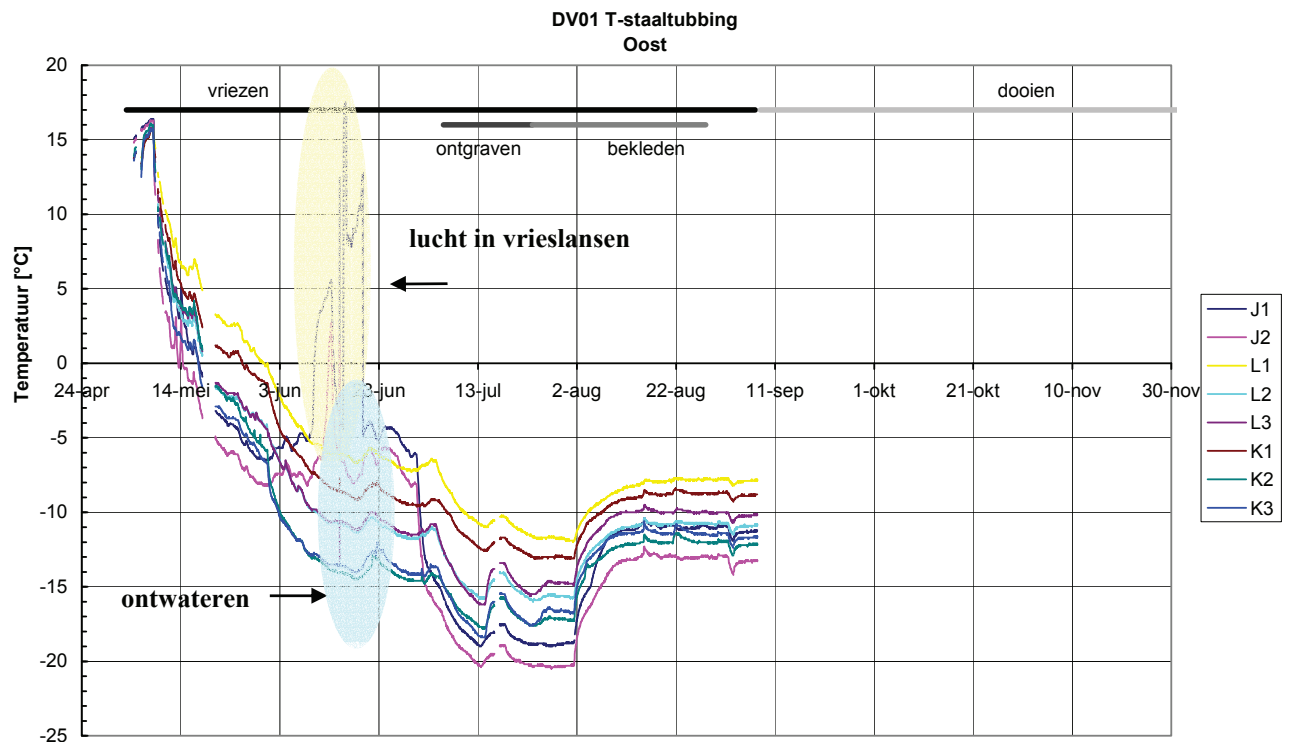
Het is voor de evaluatie van de extensometers noemenswaardig het effect van een temperatuurverandering op de metalen stang in ogenschouw te nemen. Gezien de uitzettingscoëfficiënt van ijzer ($\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ m/}^\circ\text{C}$) bij een temperatuur-verandering van bijvoorbeeld 10°C (over de totale stanglengte bij EX1-1 en EX2-1 van 13,5 meter) is een meetfout van circa 1,5 mm reëel. Dit is een aanzienlijk deel van de totale gemeten deformatie (inclusief maaiveldzettingen) van ca. 8 tot 10 mm.

7.5. TEMPERATUURONTWIKKELING VAN DE HOOFDTUNNELBUIZEN

De temperatuur van de hoofdtunnelbuizen is gedurende de gehele bouwperiode gemeten om de ijsaansluiting te kunnen volgen.

7.5.1. TEMPERATUURONTWIKKELING VAN DE OOSTBUIS BIJ DV1

Van dwarsverbinding DV1 is aan de oostkant de temperatuur van ring-3 gemeten met behulp van thermokoppels. De temperatuur werd elk uur automatisch afgelezen op de plaatsen J1 en J2, K1 tot en met K3 en L1 tot en met L3. Deze meetlocaties zijn in bijlage C4 aangegeven. De resultaten van deze metingen zijn grafisch weergegeven in Figuur 7.3.



Figuur 7.3 Temperatuur van de stalen tunnelsegmenten bij de oostbuis van DV1

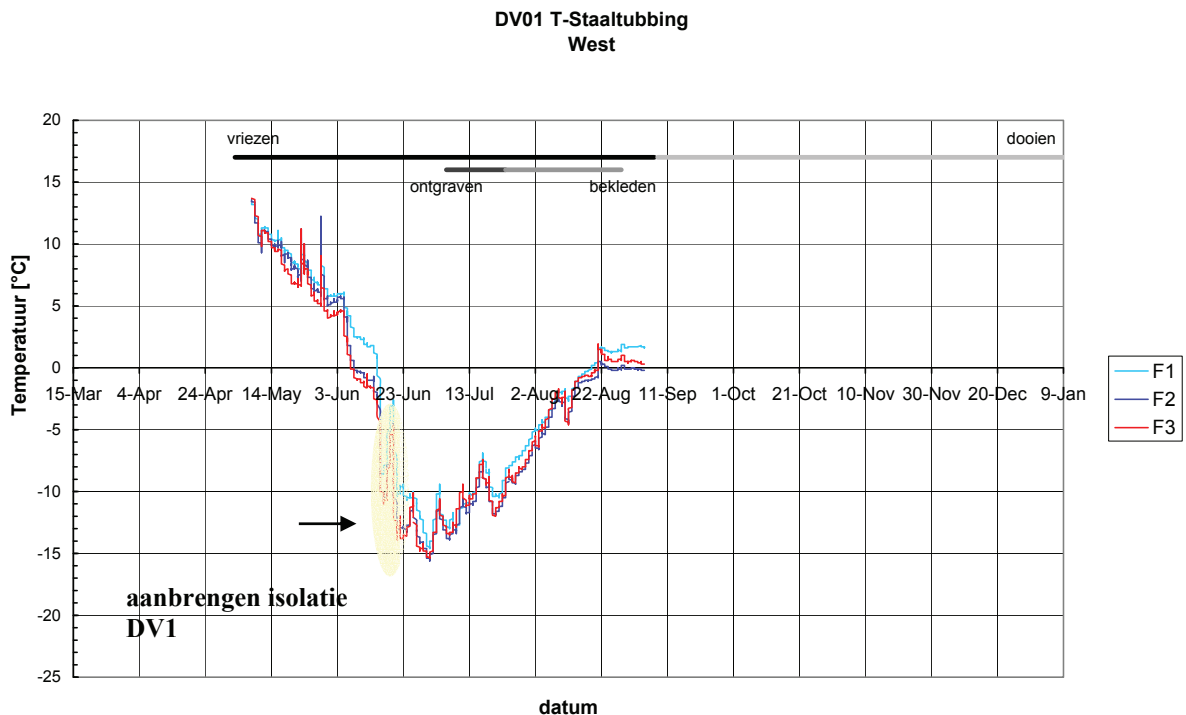
Opmerkelijk is dat bij opnemer J1 en J2 rond half juni pieken voorkomen, terwijl dit bij de overige opnemers niet het geval is (fig. 7.3). Navraag bij KMW leerde dat de oorzaak hiervoor was dat rond half juni twee vrieslansen in de buurt van J1 en J2 waren uitgevallen door luchtbelvorming (zie bijlage E1).

Tevens opmerkelijk zijn de verhoogde temperaturen van alle temperatuuropnemers in de periode van ontwateren (openen veiligheidsventiel). Bij DV1 had dit een temperatuurverhoging van 2 tot 3 °C tot gevolg (fig. 7.3).

De (relatief grote) verschillen in temperaturen tussen de verschillende meetpunten worden volgens KMW veroorzaakt doordat de meetpunten zich op verschillende afstanden van de vrieslansen bevinden.

7.5.2. TEMPERATUURONTWIKKELING VAN DE WESTBUIS BIJ DV1

De temperaturen van de tunnelsegmenten aan de westzijde zijn geregistreerd door KMW (Bijlage E4). De locaties van de meetpunten A-H staan in bijlage C5 weergegeven. In de temperatuurmetingen van sensoren E-H is de temperatuurdaling door de aangebrachte isolatie goed waargenomen. Bij DV1 is op 14 juni droogijs aangebracht aan de westbuis bij DV1 (fig. 7.4).



Figuur 7.4 Temperatuur bij sensoren F1, F2 en F3 van de stalen tunnelsegmenten bij de westbuis van DV1

7.6. DEFORMATIE VAN DE HOOFDTUNNELBUIZEN BIJ DV1

Deformaties van de hoofdtunnelbuizen DV1 worden in de volgende paragrafen besproken:

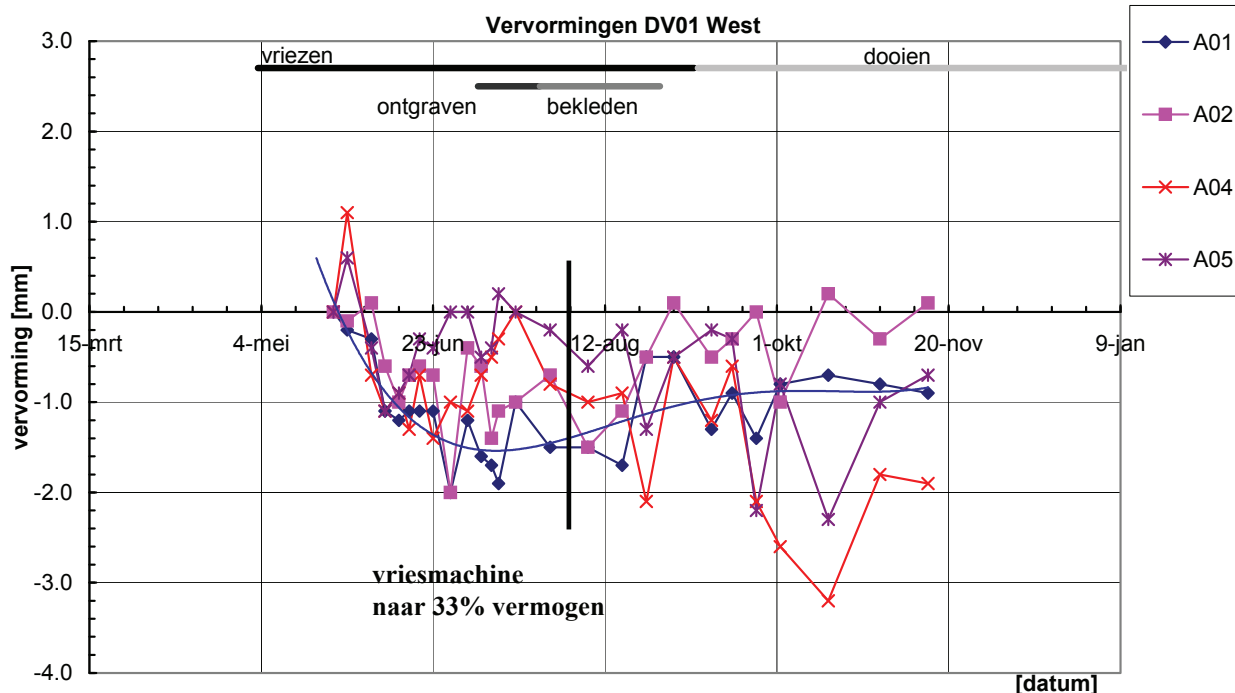
verplaatsingen – westbuis (7.6.1)

convergentiemetingen – oost- en westbuis (7.6.2)

Een negatieve vervorming komt overeen met een vervorming waarbij de tunnelbuiswand naar binnen wordt gedrukt.

7.6.1. VERPLAATSINGEN VAN DE WESTBUIS BIJ DV1

Van DV1 is aan de westkant de vervorming van de ringen 1 tot en met 7 gemeten. De vervorming is in de tijd gemeten op de plaatsen A01 tot en met A32. Deze plaatsen zijn in de tekening in bijlage C1 aangegeven. De vervorming is gemeten met behulp van een theodoliet. Deze wordt geplaatst op een punt in de tunnel waarvan de absolute positie bekend is. Op de meetpunten wordt een reflector aangebracht. Als de tunnelwand wordt ingedrukt, verandert de positie van de reflector. Volgens KMW bedraagt de nauwkeurigheid van de theodoliet-meting ongeveer 2 mm.



Figuur 7.5a Vervormingen A-punten A01-A05 bij DV01, west; een positieve waarde komt overeen met een vervorming in de richting van de buitenkant van de tunnel; een negatieve waarde in de richting van de binnenkant.

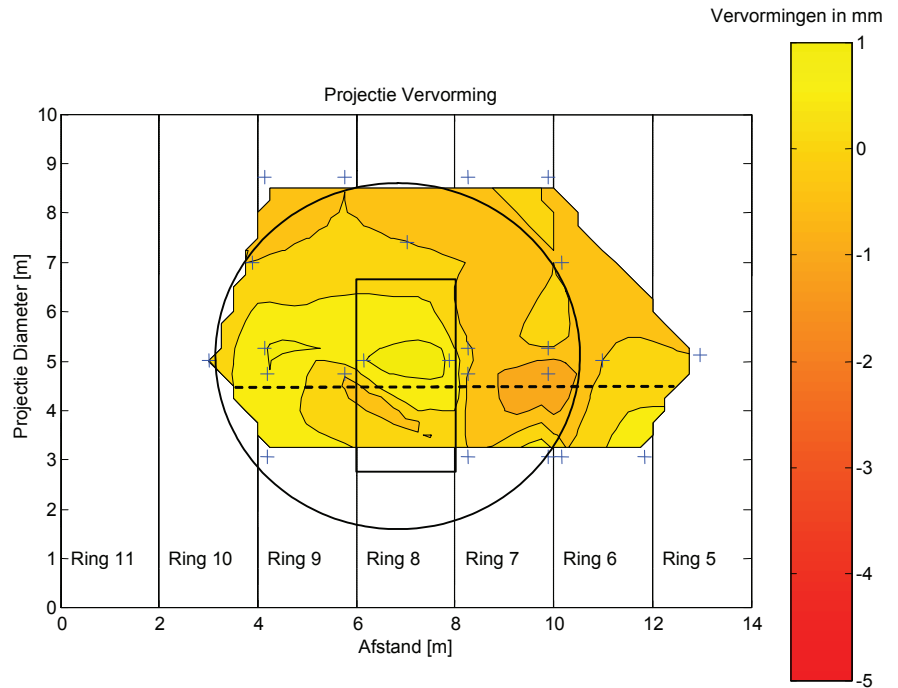
Voor meetpunt A01 is er tevens een regressielijn toegevoegd. Een negatieve vervorming komt overeen met een vervorming waarbij de tunnelbuiswand naar binnen wordt gedrukt. Het verloop van de vervorming loopt volgens de verwachting: tot begin juli loopt de temperatuur omlaag, blijft een tijdje constant en gaat vanaf begin augustus weer omhoog. Dit is tevens ruwweg het verloop van de vervorming.

De vervormingen op de meetpunten A01, A02, A04 en A05 zijn weergegeven in Figuur 7.5. De overige deformatiemetingen staan in Bijlage I. Voor de duidelijkheid zijn in deze figuur de meetpunten verbonden door rechte lijnen. Aangezien de nauwkeurigheid van de meting (± 2 mm) in dezelfde orde van grootte ligt als de meting zelf, is de waarde van gemeten vervormingen nauwelijks significant.

Voor de andere opnemers zijn vergelijkbare grafieken opgenomen in Bijlage I (Fig. 7.5b-e). In alle grafieken is een vergelijkbare (lichte) trend te herkennen dat meteen na het begin van de metingen de lijn omlaag loopt. Deze trend loopt door tot begin juli. Vervolgens lopen de lijnen min of meer recht door of iets omhoog. De trend is moeilijk te herkennen omdat de grootte van de ruis in de orde van grootte van de vervorming ligt. Hieruit volgt dat voor het bestuderen van vervormingen van deze orde van grootte de gebruikte meetmethode niet nauwkeurig genoeg is. De meetonnauwkeurigheid had in de orde van $\pm 0,1$ mm moeten liggen.

De vervormingsmetingen zijn ook in een 2D-plot weer te geven. Hiervan is een voorbeeld gegeven in Figuur 7.5. In deze figuur zijn de + tekens de A-punten en de C-punten waar de vervorming is gemeten. De plaats van de vrieslansen is weergegeven met een cirkel. Ook is in de middelste ring (ring 8) de locatie van het gat voor de dwarsverbinding geschetst.

Omdat er in een beperkt gebied metingen zijn gedaan, konden de vervormingen in een beperkt gebied zichtbaar worden gemaakt.



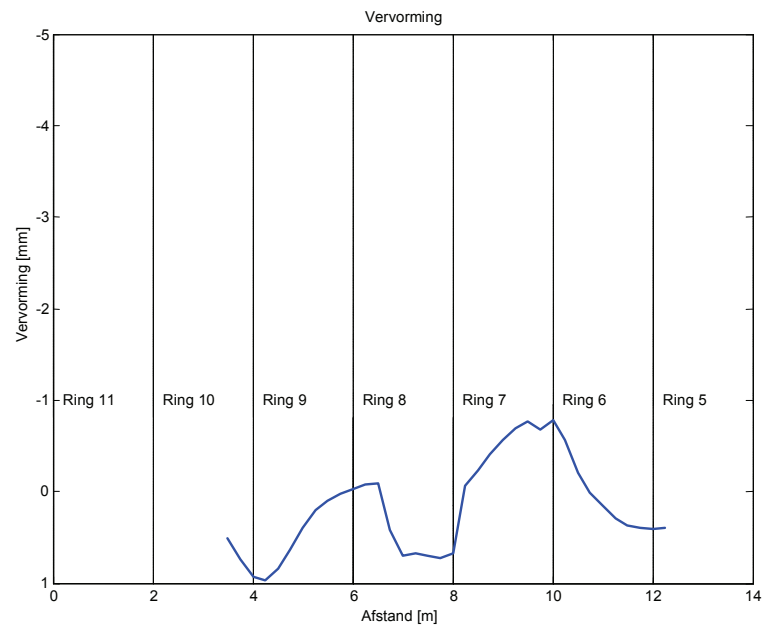
Figuur 7.6 2D-presentatie van de vervormingen van de tunnelbuis bij DV1 op 25 mei 2000.

Om de lijnen in Figuur 7.6 enigszins vloeiend te laten lopen is een regressiemethode toegepast. Dit wil zeggen dat er door de punten met behulp van de kleinste kwadraten methode een derdegraads polynoom is getrokken.

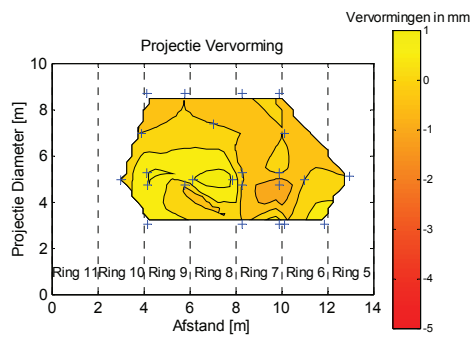
Op de hoogte waar de grootste vervormingen (in Figuur 7.6 is dit weergegeven met een gestreepte lijn) optraden is tevens een grafiek gemaakt van de vervorming als functie van de afstand. Deze grafiek is weergegeven in Figuur 7.7. Bij DV1 trad de maximale vervorming op bij een hoogte van 4,5 m. Bij DV2 was dit 5,0 m.

Er zijn ook 2D-plots gemaakt zoals in Figuur 7.6 en 7.7 van de overige verplaatsingen van de hoofdtunnelsegmenten bij DV1 op andere tijdstippen. Deze zijn verzameld in bijlage J. Deze grafieken zijn verkleind in een overzicht gezet, zodat de ontwikkeling van de vervorming in de tijd duidelijk wordt (Figuur 7.8).

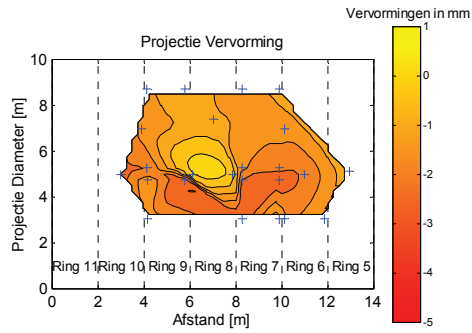
Uit dit figuur blijkt dat de grootste vervormingen over het algemeen optraden op locaties iets binnen de cirkel waarin de vrieslansen lagen. Een duidelijk patroon in de tijd is over het algemeen niet te herkennen. Dit is te wijten aan het relatief geringe aantal meetpunten en de grote ruis in de meetwaarden.



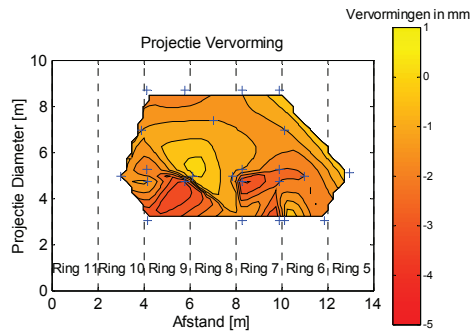
Figuur 7.7 Vervorming als functie van de afstand op de hoogte waarbij de grootste vervormingen optraden bij DV1 op 25 mei 2000.



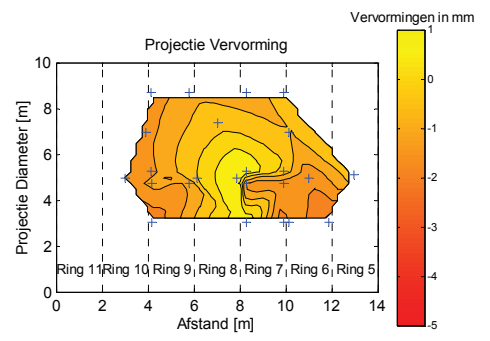
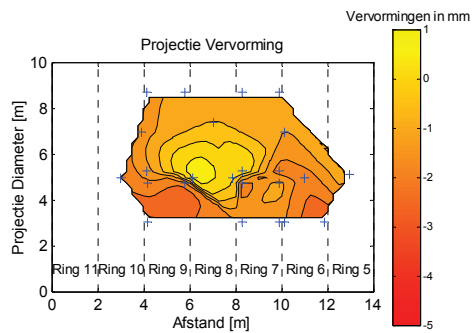
5/25/00



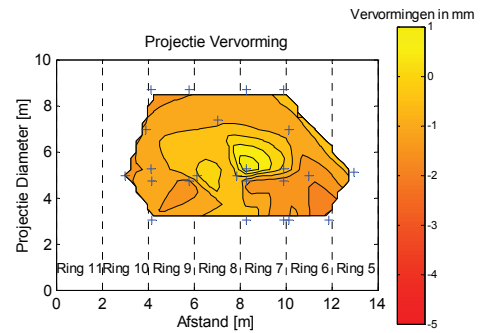
6/16/00



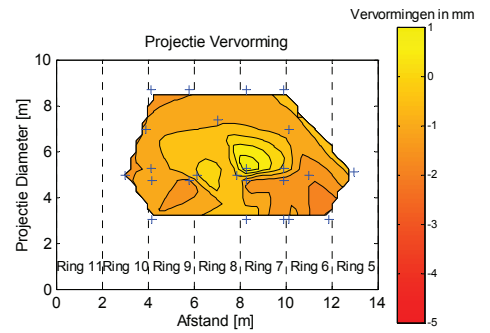
7/7/00



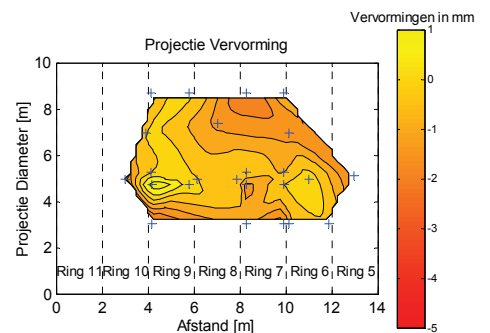
7/27/00



8/17/00



11/14/00



Figuur 7.8 Verzamelde 2D-plots van verplaatsingen van de tunnelsegmenten van westbuis bij DVI.

7.6.2. STEEKMETINGEN VAN DE WEST- EN OOSTBUIS BIJ DV1

Naast de metingen van de A-punten zijn steekmetingen van de diameter van de tunnelbuizen gedaan.

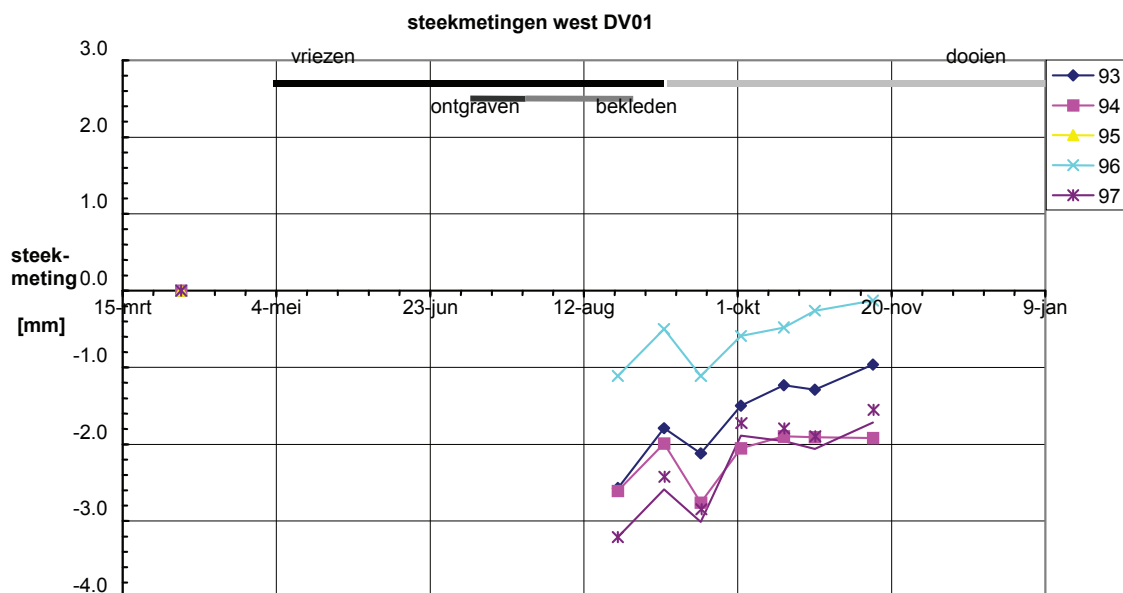
De steekmetingen zijn horizontale metingen van de diameter van de hoofdtunnel. Het zijn metingen die zijn uitgevoerd tussen een vast punt links in de tunnel naar een vast punt rechts in de tunnel.

Met een nauwkeurig meetlint werd om de ongeveer twee weken de afstand tussen de twee haken gemeten. Het meetlint was gemaakt van wolfram, waardoor de invloed van de temperatuur verwaarloosbaar klein was. De kracht waarmee het meetlint tussen de metalen ogen werd opgespannen was steeds gelijk. Met deze steekmetingen wordt niet de tunneldiameter afgelezen, maar de verandering van de diameter.

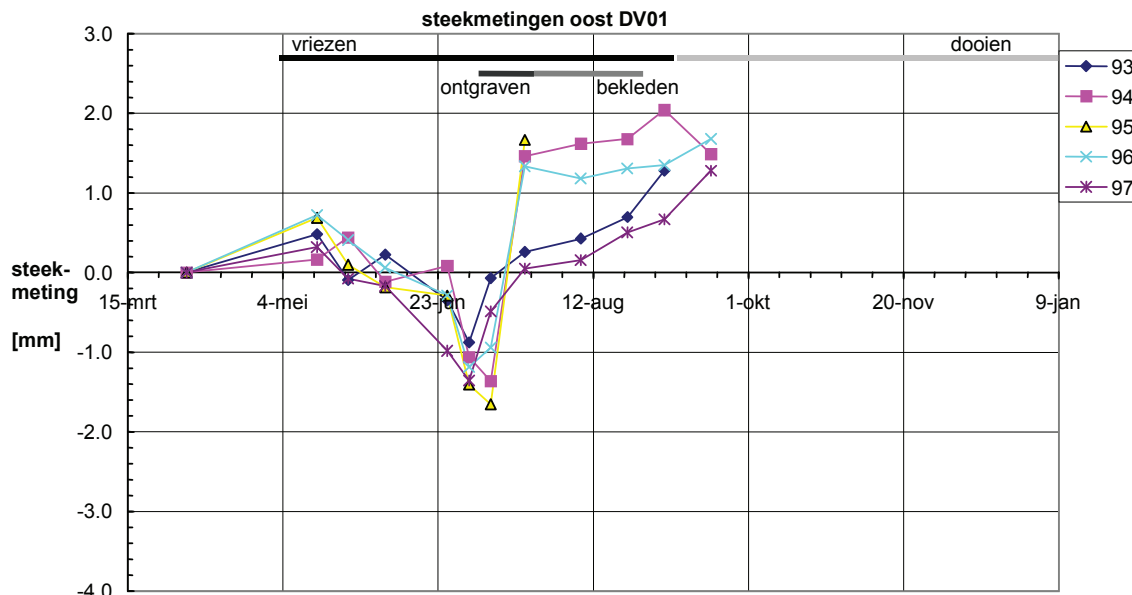
De meetreeksen 93-97 zijn het resultaat van deze meetactiviteit (Fig. 7.9 en 7.10).

De nauwkeurigheid van de meting werd door KMW geschat op $\pm 0,1$ mm. Het eerste meetpunt was de nulmeting. Op deze manier werd voor meetpunt 93 tot en met 97 de verandering van de diameter gemeten. De verandering van de diameter van de hoofdtunnelbuis bij DV1 is weergegeven in fig. 7.9 voor de westkant, en in fig. 7.10 voor de oostkant.

Een positieve waarde van convergentie betekent dat de tunneldiameter groter wordt; een negatieve dat de tunneldiameter kleiner wordt.



Figuur 7.9 Steekmetingen van DV1, west



Figuur 7.10 Steekmetingen DV₁, oost

Na de start van het vriezen neemt de horizontale diameter van de oosttunnel licht toe. Na verloop van tijd neemt deze licht af met enkele mm's. Opmerkelijk is dat de steekmeting van de oostkant van DV₁ weer groter wordt na 6 juli 2000 (fig. 7.10). Het lijkt hiermee alsof de ring tegen de druk van het ijs in vervormt. 6 juli is ook de datum waarop het graven wordt gestart. Blijkbaar heeft het graven een groter effect op de diameter van de hoofdtunnel dan de druk van het ijslichaam. De toename van de steekmaat na de vries-dooi cyclus bedraagt 1,5 mm.

De serie steekmetingen van DV₁ is incompleet (fig. 7.9). In deze serie is wel te zien dat de diameter van de westtunnel gedurende het dooiproces weer toeneemt en stabiliseert in zijn positie van voor de vries-dooi cyclus.

7.7. OPENEN VEILIGHEIDSDEUR EN CONTROLE SLUITING VAN HET IJSLICHAAM

De waterdichtheid van een ijslichaam bij opening van de deur naar de dwarsverbinding is essentieel bij grondbevriezing van waterdoorlatend zand. Ongecontroleerde waterstroming is uiteraard ongewenst bij het openen van de dwarsverbinding. Om vast te stellen of de eerste dwarsverbinding DV₁ als waterdicht beschouwd kon worden zijn drie gegevenstypen gebruikt:

ijsdikte met behulp van temperatuurmeetlansen T₁ en T₂
verloop van de waterdukmeting U in de onbevroren kern van het ijslichaam
temperatuurmetingen tunnelsegmenten in de westbuis (Bijlage E4)
temperatuurmetingen tunnelsegmenten in de oostbuis (Fig. 7.1)
metingen van afgetapte watervolumes (Bijlage A)
extra temperatuurmetingen door de tunnelsegmenten van bij DV₁

Waterdichtheid bevroren grondmassief

De aansluiting van het bevroren grondmassief op de hoofdtunnel is vereist voordat de ontgraving onder atmosferische omstandigheden kan beginnen. Onvoldoende aansluiting kan veroorzaakt worden door:
warmte-aanvoer via de stalen tunnelsegmenten vanuit de hoofdtunnels.

aanwezigheid van zout water. Zowel het lekken van vriesvloeistof (KCl) als concentratie door uitdrijving van NaCl zijn dan beide vriespuntverlagend. een defect aan een van de vrieslansen kan een andere oorzaak zijn. Chemisch onderzoek van watermonsters en temperatuuranalyse kunnen dan de richting geven waar de oorzaak gevonden moet worden.

Wanneer de *ijsdikte* voldoende werd bevonden op basis van de metingen van de temperatuurlansen, bestond er nog geen zekerheid over de *waterdichtheid* en de *ijsaansluiting* van het ijsmassief tegen de hoofdtunnels aan. De geplande ijsdikte bedroeg 2 m.

Om te controleren of het ijslichaam voldoende omvang heeft om de ontgraving te starten is een aantal methoden gebruikt. Voor de maximale veiligheid zijn alle drie methoden uitgevoerd bij DV1 om te waarborgen dat het bevroren grondlichaam waterdicht is.

1- Temperatuur grond (meetlansen)

De temperatuurgegevens van de thermosensoren in de meetlansen – die vanuit de hoofdbuizen zijn geplaatst – te analyseren. Door deze geregistreerde temperaturen te plotten tegen de afstand vanaf de vrieslans is het mogelijk de dikte van het ijslichaam te meten.

2- Temperatuur tunnelsegmenten

De ontwikkeling van de temperatuur van de tunnelsegmenten worden gevolgd. Hierbij dient rekening gehouden te worden met de diepte van de thermosensoren in de constructie.

Waterdrukventiel

In zandige waterdoorlatende grond worden testen uitgevoerd door de waterdruk in de as van het vrieslichaam te meten op de volgende wijze. De waterdichtheid van het vrieslichaam kan gegarandeerd worden met de volgende stappen:

1. wanneer na een geconstateerde waterdrukverhoging de waterdruk wordt verminderd met een veiligheidsventiel in het hart van de dwarsverbinding;
2. het ventiel dient gedurende enige tijd open te staan en het volume van het geproduceerde water wordt vergeleken met het volume van het interne onbevroren grondmassief.

Na dichtdraaien van het ventiel dient de waterdruk significant hoger te worden dan de hydrostatische druk (zie fig. 7.11).

Observaties

Een lichte verhoging van de waterdruk U bij 20 mei 2001 gaf een indicatie dat het bevroren grondlichaam zich aan het sluiten was (fig. 7.11; punt A). De temperaturen van de tunnelsegmenten aan de oostzijde waren echter in deze periode voor een veilige waterdichte situatie te hoog (zie ook bijlage E4).

Omdat ook de temperatuurvoelers te hoge temperaturen van de grond aangaven, werd geconcludeerd dat het bevroren ijsmassief niet voldoende aansloot op de hoofdtunnels.

Pas na toepassing van actieve isolatiemaatregelen kon op 6 juli 2001 de deur worden geopend aan de westzijde.

In Fig. 7.11 is vanaf 20 mei 2001 een lichte toename van de waterdruk U waar te nemen. Deze verhoging wordt waarschijnlijk veroorzaakt door druktoename van het bevroerende zand in de kern van het ijslichaam.

Bij 24 juni 2001 is te zien dat de waterdruk dramatisch afneemt door het aftappen van water door KMW via de veiligheidsklep in de deur. Pas bij punt B (fig. 7.11) is de waterdruktoename te zien die veroorzaakt wordt door het waterdichte ijslichaam en de bevroren grond aansluiting tegen de hoofdtunnelwanden. Er wordt aangenomen dat de waterdrukverhoging vanaf punt A zich niet voldoende kan opbouwen omdat er dan nog water ontsnapt via onbevroren delen in de ring van bevroren grond.

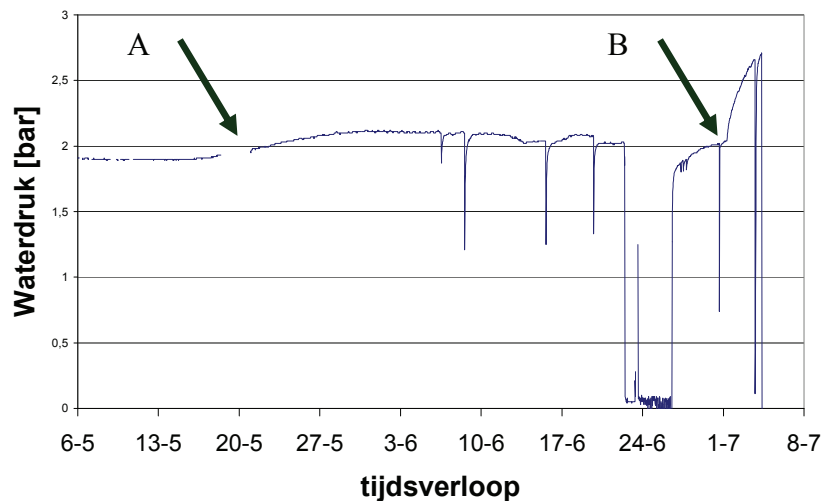
Wanneer geconstateerd wordt dat er bij het aftappen van water meer wordt geproduceerd dan het volume van de onbevroren kern, kan worden geconcludeerd dat het vrieslichaam niet gesloten is.

Zout water

Op andere plaatsen in de ijsring van DV1 zijn na grondmonsters hoge concentraties NaCl aangetroffen ($>98000 \text{ mg Cl}^-/\text{l}$). Vanwege de chemische samenstelling kon worden vastgesteld dat dit zout afkomstig was van het zoute formatiewater van geotechnische eenheid Z1. Uit de hoge concentratie Cl^- in grondmonsters kon later worden afgeleid dat er zoutwaterlenzen zijn ontstaan tijdens de grondbevriezing door zoutsegregatie. Het is onwaarschijnlijk dat deze zoutwaterlenzen hebben bijgedragen aan de onvoldoende waterdichtheid van DV1. Slechts ingesloten en ongedraineerde zoutwaterlenzen kunnen dergelijke hoge zoutconcentraties bereiken.

Actieve isolatie

Bij de aanleg van DV1 is passieve en actieve isolatie (resp. isolerende platen en droogijs) toegepast om de aansluiting van het ijslichaam op de hoofdtunnelbuizen. De temperatuurmetingen van de tunnelsegmenten van de westbuis (*Bijlage E4*) geven duidelijk de temperatuurverlaging aan als gevolg van de isolatie-maatregelen. Temperatuurvoelers E, F, G en H van DV1 geven op de dagen dat isolatie is aangebracht een abrupte temperatuurdaling tot meer dan 6°C aan.



Figuur 7.11 Verloop van de waterdruk U1 gedurende de grondbevriezing van DV1

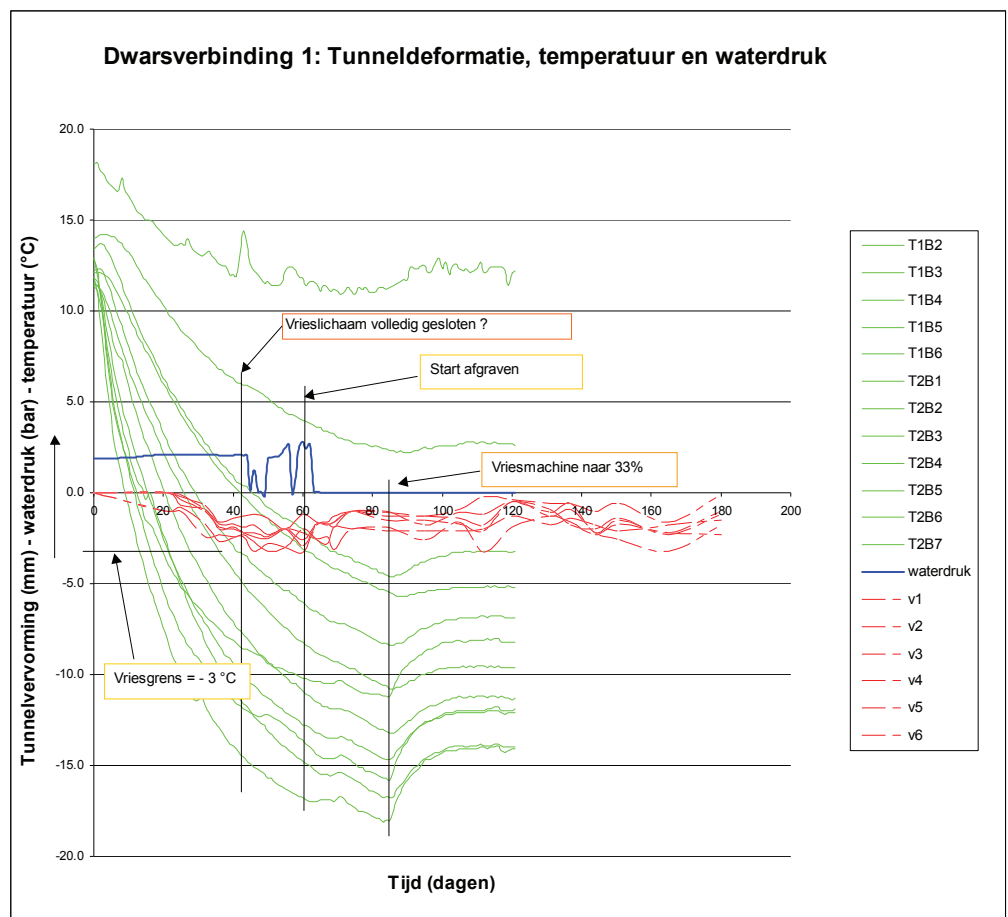
7.8. RELATIE WATERDRUK EN TUNNELDEFORMATIE

In fig. 7.12 zijn de gegevens van de temperaturen van meetlansen T1 en T2, de waterdruk bij het veiligheidsventiel, alsmede de verplaatsing van de tunnelsegmenten in de westelijke tunnel bij DV1 in één plot gegeven.

De verplaatsing van de tunnelsegmenten zijn gemiddelde waarden. De maximale verplaatsing vindt plaats gedurende de periode voor de ontgraving (in de periode van dag 20 tot dag 70). De waterdruk neemt tijdens de bevriezing licht toe met ca. 0,2 bar (zie ook fig. 7.11).

Wanneer de waterdruk in de (onbevoren) kern van het ijsmassief wordt verminderd (door ontwatering na 42 dagen) neemt de verplaatsing van de tunnelsegmenten wel af. Het is de vraag of hier een oorzakelijk verband tussen bestaat omdat tegelijkertijd de ontgraving start.

De temperatuurcurves in figuur 7.12 die andere curves doorkruisen wijzen op een lokaal afwijkende en hogere temperatuurontwikkeling. Dit is waarschijnlijk veroorzaakt door aanvoer van warmte vanuit de hoofdtunnelbuis.



Figuur 7.12 Overzicht van temperatuurmetingen van de oostbuis (T#B#), tunnelverplaatsing van de tunnelsegmenten van de westbuis (v#) en de waterdruk van het overdrukventiel DV1 (Van der Meijden, 2001).

7.9. SAMENVATTING OBSERVATIES DV1

De observaties bij de bevroering van waterdoorlatend zand bij DV1 van de Westerscheldetunnel worden in deze paragraaf samengevat.

Betrouwbaarheid van metingen van grondspanningen:

De metingen van de stress monitoring stations en de hellingmeetbuizen worden als voldoende betrouwbaar beschouwd om processen in de grond te bepalen.

De betrouwbaarheid van de absolute waarden van de spade cellen worden is gering. De meetresultaten worden dan ook slechts meegenomen bij de kwalitatieve interpretatie.

De waterspanningsmeters van VW, SC en SM monitoren de variatie in waterspanning in de as van het bevroren lichaam goed. Tijdens de periode dat de waterspanningsmeters bevroren zijn ($T < 0^{\circ}\text{C}$), is een betrouwbare interpretatie van de waterdruk niet mogelijk.

Grondspanningen:

1. Spanningsverloop:

De grondspanningen variëren gedurende de gehele periode van aanleg bij en in het vrieslichaam. Deze waarnemingen van spanningsveranderingen zijn bij DV1 als volgt:

Gedurende vriezen tot aan ontgraven:

- radiaal: lichte spanningstoename met 30-90 kPa (vorming ijslichaam)
- axiaal: lichte spanningstoename met maximaal 35-80 kPa (vorming ijslichaam)

Gedurende vriezen/ontgraven:

- radiaal: lichte spanningsafname van 35-75 kPa (relaxatie a.g.v. ontgraven)
- axiaal: lichte spanningstoename tot 75 kPa (als compensatie voor het verlies van axiale ondersteuning vanuit het hart)

Gedurende vriezen/bekleden:

- radiaal: lichte spanningstoename van 15 kPa (uitharding spuitbeton)
- axiaal: lichte spanningsafname van 15 kPa (spuitbeton neemt gedeeltelijk spanning over)

2. Waterspanning in het hart:

De waterspanningsverlaging in het hart van het bevroren grondmassief van ca. 180 kPa heeft afname van radiale en axiale grondspanningen tot gevolg:

- radiaal: spanningsafname met 15 kPa
- axiaal: spanningsafname met 40 kPa

Spuitbeton

Als gevolg van het aanbrengen van het spuitbeton treden in een korte periode significante veranderingen in temperatuur en spanning op. In deze periode zijn significante temperatuurstijgingen gemeten.

Ontgraven en bekleden

De verticale spanningen nemen gedurende de periode van ontgraven en bekleden verder toe.

Gronddeformatie:

1. Maaiveldaling

De gemeten einddeformaties van de extensometers (deze wijzen op lichte opheffing) komen overeen met de zettingsberekeningen van de grond aan het maaiveld. De gemeten verticale metingen in de bovenste extensometers dichtbij het maaiveld liggen in de ordegrootte van enkele mm's. Het is niet uit te sluiten dat een effect van vries-dooi consolidatie ook een bijdrage heeft geleverd aan de maaiveldbewegingen.

2. Hellingmeetbuizen

De maximale horizontale deformatie buiten het bevroren grondlichaam van DV1 bedraagt 4 mm. Deze lage waarde komt overeen met de verwachting van zeer lage radiale deformaties bij de aanleg van een bevroren ijslichaam in waterdoorlatend zand.

Temperatuurvariaties van de grond:

Als gevolg van temperatuurvariaties worden variaties van grondspanningen gemeten. Temperatuurvariaties van de vrieslansen hebben een lokale verlaging van de elasticiteit van het bevroren grondmassief tot gevolg. Door de gewijzigde stijfheidsverdeling ontstaat ook een andere spanningsverdeling over de bevroren grond.

Verplaatsingen tunnelsegmenten:

De verplaatsingen van hoofdtunnelsegmenten aan de westzijde van DV1 worden veroorzaakt door de grondbevriezing en bedroegen maximaal 3,2 mm. Deze maximale verplaatsing vond plaats gedurende de periode van vriezen; de axiale vriesspanning bedroeg op dat moment ca. 230 kPa.

Vanwege de meetonnauwkeurigheid van 2 mm van de verplaatsing van de tunnelsegmenten is de betrouwbaarheid van deze metingen laag. Wel staat vast dat de deformatie zeer gering is.

De grootste verplaatsingen van de tunnelsegmenten treden op in de segmenten waarin de vrieslansen geplaatst zijn die direct links en rechts van de veiligheidsdeuren liggen.

De verplaatsingen van de tunnelsegmenten verminderen na het openen van de veiligheidsdeur en de start van de ontgraving.

Gedurende grondbevriezing convergeerde de hoofdtunnelwand aan de oostbuis ca. 2 mm naar binnen. De convergentie aan de westzijde bedroeg maximaal 3 mm.

Gedurende de dooifase worden de tunnelsegmenten naar buiten de oorspronkelijke stand verplaatst en keren niet terug in hun positie van voor de aanleg (binnen de meetperiode).

Tijdens de ontgraving van de dwarsverbinding werd de diameter van de hoofdtunnelbuis enkele mm's groter dan de oorspronkelijke diameter.

De verplaatsingen van de tunnelsegmenten verlopen niet geheel synchroon met de temperatuur van de grondbevriezing, maar worden sterk beïnvloed door de ontgraving.

8. EVALUATIE DV2

Alle bij de evaluatie van DV2 behorende grafieken zijn in “Deel 2: Bijlagen Meetgegevens” verwerkt. Overzichtslijsten van deze grafieken zijn per dwarsverbinding in de inhoudsopgave van Deel 1 en Deel 2 vermeld.

De grafieken en plots met meetgegevens van DV1 zijn opgenomen in Bijlage K t/m P.

8.1. TRAJECTEN IN HET VRIES- EN DOOIPROCES

In iedere grafiek van de meetseries (Bijlage K t/m N) zijn vijf fasen tijdens grondbevriezing weergegeven (voor toelichting zie par. 6.3):

1. *vriezen (tot aan ontgraven)*
2. *vriezen-ontgraven*
3. *vriezen-bekleden*
4. *vriezen op lagere capaciteit*
5. *dooien*

In de grafieken zijn de volgende belangrijke gebeurtenissen opgenomen:

- reparatie aan de vriesinstallatie, aangegeven als ‘reparatie’
- storing in de vriesinstallatie, aangegeven als ‘storing’

Daarnaast is het moment aangegeven waarop de temperatuur van de bij het betreffende meetinstrument behorende thermosensor gelijk is aan 0°C , aangegeven als ‘ $T = 0^{\circ}\text{C}$ ’

In volgorde van de betreffende trajecten zullen de grondspanningen en waterspanningen behandeld worden versus temperatuur en tijd. In een later stadium zullen aan de hand van diezelfde trajecten de horizontale en verticale deformaties worden besproken.

8.2. TEMPERATUURVERLOOP

In deze paragraaf wordt verwezen naar de grafieken in de volgende bijlagen:

Bijlage

K1 “Vriesinstallatie DV2 » Temperaturen versus Datum”

K2 “Temperatuurmeetlans 1 (T1B) DV2 » Temperaturen versus Datum”

K3 “Temperatuurmeetlans 2 (T2B) DV2 » Temperaturen versus Datum”

K4 “Temperaturen van de tunnelsegmenten van de westbuis bij DV1 » Temperaturen versus Datum

K5 “Vibrating wire waterspanningsmeters 3 en 4 (VW3 en VW4) » Temperaturen versus Datum”

K6 “Stress monitoring stations 3 en 4 (SM3 en SM4) » Temperaturen versus Datum”

K7 “Spade cellen 5 tot en met 8 (SC5, SC6, SC7 en SC8) » Temperaturen versus Datum”

K8 “Thermosensoren 2 (TE2) » Temperaturen versus Datum”

K9 “Data-acquisitiesysteem DV2 » Temperatuur versus Datum”

8.2.1. ALGEMEEN

Vanaf het moment dat de vriesinstallatie gaat functioneren op 16 juni 2000 beginnen de temperaturen bij de meetinstrumenten te dalen (bijlage K1-K9). De snelheid waarmee de temperatuur daalt hangt af van de positie van de opnemer ten opzichte van de vrieslansen.

Per 5 september 2000 gaat de vriesinstallatie op lagere capaciteit werken. Dit is direct waar te nemen in de metingen. Ook hier geldt dat de afstand van het meetinstrument tot de vrieslansen bepalend is voor de snelheid van de temperatuuroptename.

Op 26 oktober 2000 wordt de vriesinstallatie uitgezet. Vanaf dit moment is het interessant om de temperatuur van de beide spade cellen SC6 en SC7 te volgen (bijlage K7). Deze stijgen veel sneller dan de temperatuur bij de overige opnemers. Dit is het gevolg van de locatie van deze opnemers. De omgevingsinvloeden op SC6 en SC7 zijn groter door de inmiddels volledig voltooide dwarsverbinding. Nadat de ontgraving heeft plaatsgevonden wordt het vrieslichaam ook van binnenuit opgewarmd.

8.2.2. EXTERNE INVLOEDEN

Naast temperatuurveranderingen onder invloed van de vriesinstallatie kunnen andere invloeden variaties in het temperatuurverloop van meetinstrumenten veroorzaken. Het betreft:

1. Invloed van de temperatuur van de buitenlucht, indien het instrument vlak onder het maaiveld ligt.
2. Invloed van de heersende temperatuur in de tunnelbuizen en tunnelsegmenten, indien het instrument dicht bij één van de tunnelbuizen ligt. De temperatuur in de tunnel is weer afhankelijk van de warmteafgifte door aanwezige machines, isolatiemaatregelen, het bouwproces en de temperatuur van de buitenlucht.
3. Variaties in de in- en uitrede temperatuur van de koelvloeistof in de vriesinstallatie, indien het instrument dicht bij één of meerdere vrieslansen ligt. Dit kan veroorzaakt worden door storingen in en reparaties aan de vriesinstallatie.
4. Invloed van het bouwproces, zoals de ontgraving en het aanbrengen van spuitbeton.

INVLOED TEMPERATUUR BUITENLUCHT

Opnemer TE2-6 ligt het dichtst bij het maaiveld en de metingen verlopen ongeveer conform de gemeten buitentemperatuur (bijlage K9; vergelijk bijlage K7). De buitentemperatuur wordt gemeten ter plaatse van het data-acquisitiesysteem van DV2 op ca. één meter boven maaiveld.

INVLOED TEMPERATUUR TUNNELBUIZEN EN TUNNELSEGMENTEN

Deze invloed is bij DV2 ook waargenomen in de gegevens van de grondmonitoring. In tegenstelling tot de situatie bij DV1 zijn de tunnelbuizen echter al langer aanwezig, waardoor de grond reeds meer is opgewarmd. Ter plaatse van DV2 zijn daardoor hogere starttemperaturen gemeten. Bij de spade cellen is de starttemperatuur hoger dan bij de stress monitoring stations. Dit is te wijten aan de aanwezigheid van de tunnelbuizen. De spade cellen liggen dicht tegen de tunnelbuizen aan dan de stress monitoring stations (bijlage K6 en K7).

VARIATIES VAN DE IN- EN UITTREDETEMPERATUUR KOELVLOEISTOF

VRIESINSTALLATIE

Tijdens het vriezen heeft de vriesinstallatie geen constante temperatuur geleverd. In de grafiek van Bijlage K1 van de vriesinstallatie zijn de nodige haperingen en storingen te zien.

Tijdens de uitvoering moest de vriesinstallatie gerepareerd worden. Het moment waarop dit gebeurd is bij SC6 en SC7 optimaal waar te nemen in de vorm van een temperatuurstijging (bijlage K7). Deze meetinstrumenten liggen dicht tegen de vrieslansen aan.

Tussentijds is nog een aantal andere haperingen in de vriesinstallatie waar te nemen (Bijlage K1). Voornamelijk de periode met minder hoge vriestemperatuur in de periode van reparatie en storing heeft een grote invloed op het temperatuurverloop. Ook hiervan zijn de gevolgen het duidelijkst zichtbaar bij SC6 en SC7.

INVLOED BOUWPROCES

Net als bij DV1 stroomt tijdens en na ontgraven warme lucht in het ontgraven gedeelte, wat het vrieslichaam opwarmt. Daarnaast zorgt de hydratatiwarmte van het aangebrachte spuitbeton voor een opwarming. Dit laatste is echter niet duidelijk uit de grafieken van DV2 te halen. Dit komt doordat de periode van vriezen op lagere capaciteit gelijktijdig met de periode van bekleding valt (bijlage K1 en K2).

8.3. SPANNINGSVERLOOP

8.3.1. STIJFHEID VAN DE GROND

Veranderingen in de stijfheid van de grond door grondbevriezing en de relatie tussen stijfheid en spanningsveranderingen is hetzelfde als bij DV1.

Voor lineair-elastisch materiaal is het spanningsverloop afhankelijk van de stijfheid van de grond en de vervorming. De stijfheidmodulus E is globaal gezien direct gerelateerd aan het quotiënt van respectievelijk grondspanning σ en vervorming ε .

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Bij externe spanningsverandering speelt hoofdzakelijk de vervorming een rol. Bij interne spanningsveranderingen verandert ook de stijfheid van de grond.

Een cilindervormig vrieslichaam zal ten tijde van bevriezing aangroeien en een met afnemende temperatuur gepaard gaande stijfheidstoename veroorzaken. De stijfheid van het bevroren grondlichaam is daardoor niet overal gelijk, maar afhankelijk van de temperatuur.

Een zelfde bouwprocedure als bij DV1 zorgt, afgezien van de verschillen in reactie op grondbevriezing van zand ten opzichte van klei, voor kwalitatief dezelfde spanningsveranderingen.

Klei vs zand

De optredende spanningsveranderingen zijn bij DV2 veel groter dan bij DV1. De oorzaak hiervan is dat zand water uitdrijft ten tijde van bevriezing en klei niet. Daarentegen kan klei juist water aanzuigen. Het water zet vervolgens uit, met als gevolg dat de totale deformatie en spanning stijgt. Het watergehalte is hierin erg belangrijk, net als het vermogen van de grond om water aan te zuigen, de permeabiliteit. Door de heterogeniteit van de klei van het Laagpakket van Boom met afwisselende siltige laagjes, kunnen de optredende veranderingen door bevriezing in grond- en waterspanningen variëren.

8.3.2. VERGELIJKING VAN SPANNINGSOPNEMERS ONDERLING

Tijdens de evaluatie worden de gemeten spanningen per opnemer vergeleken met een of meerdere opnemers op soortgelijke posities. Naar verwachting moeten opnemers die op dezelfde positie ten opzichte van het vrieslichaam liggen, dezelfde spanningsveranderingen meten. In tabel 8.1 staan de posities van de opnemer ten opzichte van het ijslichaam aangegeven.

Tabel 8.1 Vergelijk gemeten spanningen ten opzichte van de positie van de opnemers

	evenwijdig aan het vrieslichaam	loodrecht op het vrieslichaam	verticaal
buitenzijde vrieslansen 	SC5-1 SC8-1 SM3-2 SM4-2	SM3-3 SM4-3	SM3-1 SM4-1
binnenzijde vrieslansen 	SC6-1 SC7-1		

Met het vergelijken van spade cellen met stress monitoring stations moet men zich ervan bewust zijn dat de spade cellen in de stijve klei van het Laagpakket van Boom zijn weggedrukt en dat de stress monitoring stations zijn ingegraven. Het gevolg hiervan is, dat de spade cellen zeer hoge beginspanningen meten en dat de stress monitoring stations juist lage beginspanningen meten. De spanningsveranderingen zijn bij de spade cellen aan de buitenzijde van de vrieslansen minder extreem dan bij de stress monitoring stations. Een mogelijke verklaring hiervoor is, dat rond de randen van de spade cellen boogspanningen optreden. Deze kunnen de optredende spanningsverandering wegleiden over de randen.

Aan de binnenzijde van de vrieslansen, bij SC6 en SC7, treden grote fluctuaties op in spanningen (bijlage L4 en L5). Hoewel nog nauwelijks temperatuurveranderingen worden gemeten ter plaatse van de spanningsmetingen, zijn de spanningsfluctuaties waarschijnlijk veroorzaakt door temperatuurfluctuaties (storingen vriesmachine). Door wijziging van de temperatuur rondom de vrieslans verandert de stijfheid van de grond en daarmee ook de verdeling van de kracht over het gehele oppervlak. Hierdoor is het mogelijk dat wel een spanningsverandering wordt gemeten, terwijl nog geen temperatuursprong wordt gevonden.

8.3.3. GRONDSPANNINGEN EN WATERSPANNINGEN

In dit hoofdstuk wordt verwezen naar de meetseries van gronddrukken in de volgende bijlagen:

Bijlage

- L1-a “Stress monitoring station 3 (SM3) » Absolute grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum”
- L1-r “Stress monitoring station 3 (SM3) » Relatieve grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum”
- L2-a “Stress monitoring station 4 (SM4) » Absolute grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum”
- L2-r “Stress monitoring station 4 (SM4) » Relatieve grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum”

- L3-a “Spade cel 5 (SC5) » Absolute grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum”
- L3-r “Spade cel 5 (SC5) » Relatieve grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum”
- L4-a “Spade cel 6 (SC6) » Absolute grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum”
- L4-r “Spade cel 6 (SC6) » Relatieve grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum”
- L5-a “Spade cel 7 (SC7) » Absolute grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum”
- L5-r “Spade cel 7 (SC7) » Relatieve grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum”
- L6-a “Spade cel 8 (SC8) » Absolute grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum”
- L6-r “Spade cel 8 (SC8) » Relatieve grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum”
- L7-a “Spade cellen (SC5-SC8) en stress monitoring stations (SM3 en SM4) » Absolute waterspanningen versus Datum”
- L7-r “Spade cellen (SC5-SC8) en stress monitoring stations (SM3 en SM4) » Relatieve waterspanningen versus Datum”

- M1-a “Vibrating wire waterspanningsmeter (VW3) » Absolute waterspanning versus Temperatuur en Datum”
- M1-r “Vibrating wire waterspanningsmeter (VW3) » Relatieve waterspanning versus Temperatuur en Datum”
- M2-a “Vibrating wire waterspanningsmeter (VW4) » Absolute waterspanning versus Temperatuur en Datum”
- M2-r “Vibrating wire waterspanningsmeter (VW4) » Relatieve waterspanning versus Temperatuur en Datum”

M3 Absolute waterspanning hart dwarsverbinding 2 (KMW-meting)

Bij DV1 werden geen grote variaties in de waterspanningen verwacht en gemeten (met uitzondering van SC2-2 en SC3-3). Dit heeft te maken met de drainerende werking van het goed doorlatende en watervoerende zandpakket.

Bij DV2 bevinden de waterspanningsmeters zich in de klei van het Laagpakket van Boom. De klei zal ten tijde van bevrozing voordat het 0 °C punt bereikt is, eerst een waterspanningstoename ondervinden en net voor het 0 °C punt een spanningsafname, ofwel zuiging. Deze spanningsafname wordt geïnterpreteerd als een aanzuiging van water (ofwel cryosuctie).

De waterspanningstoename in de ongedraineerde klei ontstaat door de uitzetting van het bevroren grondlichaam en opspanning van de omringende grond. De waterspanningsafname net voor het 0 °C punt ontstaat doordat het vorstfront in aantocht is. Het vorstfront zuigt water uit de omgeving aan. De totale zuiging kan tot onder het absolute nulpunt geraken. Dit houdt in dat de waterspanning tot onder de atmosferische druk komt en impliceert een spanningsafname richting vacuüm (-100 kPa). De grafieken in bijlage L7, M1 en M2 geven een beeld van de ontwikkeling van de waterspanningen bij DV2.

Niet alle waterspanningsmeters meten een spanningsafname voor het 0 °C punt. Zo meet SC7-2 (bijlage L5) een toename tot ver onder de 0 °C. Beide stress monitoring stations SM3-4 en SM4-4 meten de waterspanningsafname pas na het 0 °C punt (bijlage L1 en L2). Dit kan te maken hebben met de manier van installatie. Beide instrumenten zijn in een boorgat geplaatst en afgestort met oorspronkelijk materiaal. Het kan zijn dat tussen dit materiaal openingen zitten waardoor de aanvoer van water op een snelle manier gerealiseerd kan worden. SM3-4 en SM4-4 meten wel beide een waterspanningstoename in de periode voordat de 0 °C is bereikt. Daarnaast is de positie van de waterspanningsmeter ten opzichte van de temperatuuropnemer van belang voor het moment waarop de spanningen ten opzichte van de temperatuur veranderen.

Over het algemeen zijn de waterspanningen bij de spade cellen hoog in vergelijking met de verwachte waterspanningen ter plaatse. Dit komt doordat deze instrumenten zijn weggedrukt, waardoor de grond opgespannen wordt. Omdat de instrumenten zich in de ongedraineerde klei bevinden duurt het een tijd voordat de waterspanning weer op oorspronkelijk niveau is. Men kan duidelijk zien dat bij SC5-2, SC7-2 en voornamelijk SC8-2 de waterspanningen dalen voordat met vriezen begonnen is (bijlage L3-L6). De gemeten nulmetingen voor de grond- en waterspanningen bij SC8 zijn het hoogst in vergelijking met de verwachte spanningen (zie hoofdstuk over de nulmetingen). Dat SC6-2 dit gedrag niet vertoont, ligt waarschijnlijk in het feit dat de grond rondom SC6 minder opgespannen is.

Uitzonderingen op het hierboven beschreven algemene verwachte en gemeten waterspanningsverloop zijn uiteraard de gemeten waterspanningen bij VW3-1 en VW4-1. Opnemer VW3-1 (bijlage M1) ligt in het hart van DV2. Tijdens bevroren zal de grond in het hart opgespannen worden omdat de klei ongedraineerd is. Op 19 juli wordt in de klei 6 liter/uur geproduceerd, terwijl er in zand 124 liter/uur bij DV1 is afgetapt. Een compressie zal zodoende leiden tot een toename van de waterspanning in het hart van DV2 (bijlage M3). De metingen bij VW3-1 stoppen op het moment dat ontgraving aanvangt. De opnemer is in die periode verwijderd.

VW3-2 (Bijlage M1) meet een waterspanningstoename totdat de temperatuur onder de 0 °C komt. Vanaf dat moment daalt de waterspanning en er ontstaat een zuiging. Uiteindelijk loopt de temperatuur op en daarmee ook de waterspanning. De positie van de opnemer is dan bepalend voor de ontwikkeling van de waterdruk in de klei. De eindwaarde voor de waterspanning is lager dan de beginwaarde.

VW3-3 meet een constante waterspanning versus de datum en ligt dan ook ver van het ijslichaam af. De temperatuur bij VW3-3 komt niet onder de 0 °C en neemt slechts in geringe mate af. VW4-1 (bijlage M2) ligt net boven het hart van het vrieslichaam en met een zeer snelle temperatuurdaling met daaraan gekoppeld eerst een stijging en na het 0 °C punt een daling van de waterspanning. Uiteindelijk stijgt bij een temperatuur nog onder het 0 °C punt de waterspanning. VW4-1 meet vanaf dat moment weer een toename die hoger is dan de oorspronkelijke beginwaarde. De reden hiervoor is onbekend. De gemeten eindwaarde komt net als bij VW3-1 lager uit dan de beginwaarde. Gezien de richtingscoëfficiënt van de curve lijkt het erop dat ook bij VW4-1 de waterspanning na verloop van tijd richting de nulmeting zal gaan. VW4-2 meet eerst een toename en vervolgens een afname.

Bij SC5-2 (bijlage L3) doet zich een onverklaarbaar fenomeen voor. De waterspanning stijgt namelijk in de periode voordat het vriezen begonnen is. Verder meet SC5-2 wat verwacht wordt, namelijk eerst een daling voordat het vriezen begint. Vervolgens een stijging en een daling in de periode tot aan het 0 °C punt, resulterend in aanzuiging.

De metingen bij SC6-2 zijn ook volgens de verwachting (bijlage L4). Door de snelle afkoeling ter plaatse kan waterspanningstoename door opspanning van het vrieslichaam maar heel even optreden. Dit uit zich in een zeer kleine toename. Voor het 0 °C punt treedt een afname op. De afname gaat door tot richting vacuüm en de toename vindt plaats rond het tweede 0 °C punt.

De waterspanning bij SC7 vertoont in het begin van de vriesperiode een opmerkelijk hoge waarde. Een waterspanningstoename wordt eigenlijk alleen verwacht voordat de temperatuur onder de 0 °C komt. Het is niet duidelijk waarom deze waarde stijgt en waarom deze waarde zo extreem hoog is, tegen de 550 kPa (relatief). Vervolgens daalt de waterspanning tot net boven de atmosferische druk; er treedt dan zuiging of cryosuctie op. Op het moment dat de temperatuur stijgt en in de buurt komt van het 0 °C punt daalt de waterspanning nogmaals, dit keer wel richting vacuüm. Ook hiervoor is geen verklaring te geven. De waterspanning dient in deze periode constant te zijn.

De afname van de wateroverspanning in combinatie met een waterspanningstoename door opspanning van het vrieslichaam leidt bij SC8-2 tot een neutrale meting.

Er is geen eenduidige verklaring voor de waterspanningen in de periode van dooi. Bij SC5-2 stijgt de waterspanning pas als de temperatuur al ruim boven de 0 °C is. SC6-2, SC7-2 en SC8-2 meten een toename precies op het moment dat de temperatuur rond de 0 °C komt. SM3-4, SM4-4, VW3-2 en VW4-1 meten al een toename op het moment dat de temperatuur nog ruim onder de 0 °C ligt. De beste verklaring is het verschil in positie van de temperatuuropnemer ten opzichte van de waterspanningsmeter per instrument.

De eindwaarden van de waterspanningen zijn lager dan de beginwaarden. Dit kan veroorzaakt zijn door de manier van installatie of doordat de temperaturen en deformaties nog niet op het oorspronkelijke niveau gestabiliseerd zijn.

Concluderend kan gesteld worden dat de variaties van de waterspanningen bij de grondbevriezing van DV2 in grote lijnen verklaard kunnen worden, maar dat de ontwikkeling te complex en variabel verloopt om een sluitende verklaring te geven.

Plastische klei

Direct voor de ontgravingsfase is op 22 augustus 2000 is tijdens inspectie van de grond achter de tunnelsegmenten (door het boren van enige speciale boorgaten door de tunnelwand) onbevroren klei met een zeer lage plasticiteit in het hart van DV2 aangetroffen. De lage plasticiteit wordt verklaard door de wateroverspanning in het hart van dwarsverbinding DV2.

8.3.4. ALGEMEEN GRONDSPANNINGEN

In dit hoofdstuk wordt per traject in het vries- en dooiproces de spanningsverandering behandeld.

VRIEZEN

Net als bij DV1 moet voor het evalueren van het gemeten spanningsverloop rekening gehouden worden met de positie van een opnemer. Daarvoor worden net als bij de evaluatie van DV1 de volgende twee termen gebruikt:

- *externe spanningsverandering*: door bevriezing optredende spanningsverandering in de omgeving van het vrieslichaam. De betreffende spanningsopnemer ligt buiten het vrieslichaam. Gemeten zijn:
 - spanning evenwijdig aan het vrieslichaam
 - spanning loodrecht op het vrieslichaam
 - spanning verticaal
 - waterspanning
- *interne spanningsverandering*: door bevriezing optredende spanningsverandering in het vrieslichaam. De betreffende spanningsopnemer ligt in het vrieslichaam. Gemeten zijn:
 - spanning evenwijdig aan het vrieslichaam (is gelijk aan axiale spanning)
 - spanning loodrecht op het vrieslichaam (is gelijk aan radiale spanning)
 - spanning verticaal (is hier gelijk aan ringspanning)
 - waterspanning

EXTERNE SPANNINGSVERANDERINGEN

Observaties

- Loodrechte externe spanning; SM3-3 en SM4-3 (bijlage L1 en L2) meten beide vrijwel direct een grote spanningstoename. Dit gebeurt terwijl de temperatuur nog boven de 0 °C is. Krimp is niet gemeten. Het is opmerkelijk dat er geen verandering in de toename is op het moment dat de temperatuur de 0 °C nadert. De waterspanning is in geringe mate toegenomen.
- Evenwijdige externe spanning; De externe grondspanningen nemen toe door opspanning. Dit gaat door totdat de waterspanning door aanzuiging van het naderende vorstfront afneemt. De grondspanningen nemen daardoor ook af. SM3-2 en SM4-2 beginnen op een normaal beginspanningniveau en meten door opspanning een grote externe spanningstoename.

SC5-1 en SC8-1 (bijlage L3 en L6) beginnen beide op een zeer hoge beginwaarde. Door het wegdrukken van de instrumenten is de grond rondom aanzienlijk opgespannen. SC5-1 en SC8-1 meten in het begin daarom eerst een geringe spanningsafname als gevolg van een waterspanningsafname door. Het overspannen water vloeit af. SC6-1 en SC7-1 (bijlage L1 en L2) liggen aan de binnenzijde van de vrieslansen. Het is opmerkelijk dat het beginspanningsniveau van deze opnemers in vergelijking met SC5 en SC8 lager is, maar nog steeds hoog. De periode waarover externe spanningsveranderingen gemeten worden is door de ligging van deze opnemers in de nabijheid van de vrieslansen zeer kort. De temperatuur daalt erg snel. SC6-1 meet een duidelijk externe spanningstoename. De waterspanning bij SC6-1 daalt erg snel. SC7-1 meet wel een spanningstoename, maar in vergelijking met SC6-1 is deze zeer gering.

- Verticale externe spanning; SM4-1 meet een externe spanningstoename. Deze ontstaat door externe opspanning van het uitzettende naderende vrieslichaam. Bij DV1 werd een verticale ontspanning gemeten. Bij DV2 is de externe opspanning vele malen groter dan bij DV1. De spanningstoename bij SM4-1 komt later dan de radiale en axiale opspanning. Mogelijk is in de beginfase toch sprake geweest van rek. Dit zou zich dan niet geuit hebben door de toename in waterspanning, met als resultaat een totale grondspanningstoename.

In Tabel 8.2 staan de maximale relatieve spanningsveranderingen in de periode tot 0 °C aangegeven.

opnemer	richting	spannings- verandering [kPa]	waterspannings- verandering [kPa]	grafieken
SC5-1 grondspanning evenwijdig	evenwijdig	70 gevolgd door -40	65 gevolgd door -30	L3
SC6-1 grondspanning evenwijdig	evenwijdig	210	-360	L4
SC7-1 grondspanning evenwijdig	evenwijdig	25	40	L5
SC8-1 grondspanning evenwijdig	evenwijdig	40 gevolgd door -150	-90	L6
SM3-1 grondspanning verticaal	verticaal	-	-	L1
SM3-2 grondspanning evenwijdig	evenwijdig	550	25	idem
SM3-3 grondspanning loodrecht	loodrecht	200	25	idem
SM4-1 grondspanning verticaal	verticaal	625	25	L2
SM4-2 grondspanning evenwijdig	evenwijdig	625	25	idem
SM4-3 grondspanning loodrecht	loodrecht	390	25	idem

Tabel 8.2 Relatieve spanningsveranderingen die optreden gedurende de periode tot 0 °C. Aangegeven zijn de spanningsveranderingen van maximum tot minimum of vice versa en niet de waarden ten opzichte van de nulmetingen.

Toelichting

Bij SM3 en SM4 zijn in alle richtingen gelijke maximale vriesspanningen gemeten. De spanningstoename gedurende de vriesperiode bedraagt maximaal ca. 800 kPa. Volgens de resultaten van de 3D-laboratoriumexperimenten en theorie van vorstuitzetting (Konrad en Morgenstern, 1980) is de spanningsontwikkeling afhankelijk van de oriëntatie ten opzichte van de temperatuurgradiënt. In-situ bij de Westerscheldetunnel (klei) is nu anders gemeten.

Bij DV₁ werd een externe spanningsafname gemeten. Bij DV₂ is dat niet het geval. De spanningsveranderingen die bij DV₁ door krimp optraden waren erg klein, maar wel duidelijk zichtbaar. Krimp zal bij DV₂ ongetwijfeld ook optreden, alleen is dat niet gemeten. Dit komt doordat de externe spanningstoename door uitzetting van een reeds ontstaan vrieslichaam rond de vrieslansen vele malen groter is.

INTERNE SPANNINGSVERANDERINGEN

Observaties

Alle opnemers meten vanaf een periode dat ze in het vrieslichaam zitten na een algemene spanningstoename door vriesopspanning een daling in de interne grondspanningen. Bij elk instrument gebeurt dit op een ander tijdstip.

- Radiale interne spanning; SM₃₋₃ en SM₄₋₃ meten beide een interne spanningsafname door kruip (bijlage L₁ en L₂).
- Axiale interne spanning; SM₃₋₂, SM₄₋₂ en SC₅₋₁ (Bijlage L₁, L₂ en L₃) meten eerst conform de verwachting een toename door vriesopspanning en daarna een afname in de grondspanningen door kruip. SC₅₋₁ meet na verloop van tijd weer een geringe toename. Dit heeft te maken met het evenwicht rond opspanning en kruip. Blijkbaar is de temperatuur te laag geworden en wordt verminderd door kruipprocessen. SC₈₋₁ meet alleen een geringe toename. Dit heeft waarschijnlijk te maken met de hoge beginspanning bij SC₈ (bijlage L₆).
SC₆₋₁ meet eerste nog een piektoename in de interne grondspanning. Dit effect op zich is vaker gezien bij grondbevriezing. Door een abrupte temperatuurtoename moeten de grondspanningen over het gehele vrieslichaam herverdeeld worden. In eerste instantie is het dan toch een lokaal effect, een schrikeffect. Opmerkelijk is dat de spanning toeneemt door temperatuurtoename. Een temperatuurtoename leidt immers tot een lokale stijfheidsafname en gekoppeld daaraan een lokale spanningsafname. Vervolgens meet SC₆₋₁ een door kruip ontstane ontspanning. Het tweede schrikeffect ontstaat door de storing in de installatie. Dit is weer een toename in plaats van een afname. Daarna daalt de temperatuur verder en vermindert de kruip, met als gevolg dat een spanningstoename wordt gemeten door vriesopspanning (het water bevriest weer). SC₇₋₁ meet ook een dergelijk schrikeffect in de vorm van een verwachte spanningsafname. Na de storing meet SC₇₋₁ voornamelijk kruipontspanning, met een opmerkelijk minimum tot circa 100 kPa.
- Interne ringspanning; SM₄₋₁ meet een interne spanningsafname door kruipprocessen van bevroren grond (bijlage L₄).

In tabel 8.3 staan de totale interne spanningsveranderingen vanaf het 0 °C punt tot de start van ontgraven.

Tabel 8.3 Relatieve spanningsveranderingen die optreden gedurende de periode vanaf 0 °C tot de start van ontgraven. Aangegeven zijn de spanningsveranderingen van maximum tot minimum of vice versa en niet de waarden ten opzichte van de nulmetingen. De spanningsveranderingen zijn afgerond op 5 kPa.

opnemer	richting	spannings- verandering [kPa]	waterspanning- verandering [kPa]	grafieken
SC5-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	175 gevolgd door -90	-415	L3
SC6-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	170 gevolgd door -190	-370	L4
SC7-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	215 gevolgd door -680	550 gevolgd door -810	L5
SC8-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	20	-60	L6
SM3-1 grondspanning verticaal	ring	-	-	L1
SM3-2 grondspanning evenwijdig	axiaal	100 gevolgd door -270	-300	idem
SM3-3 grondspanning loodrecht	radiaal	545 gevolgd door -120	-300	idem
SM4-1 grondspanning verticaal	ring	-300	-280	L2
SM4-2 grondspanning evenwijdig	axiaal	-380	-280	idem
SM4-3 grondspanning loodrecht	radiaal	210 gevolgd door -100	-280	idem

Toelichting

Vanaf het moment dat de temperatuur onder de 0 °C stijgt de grondspanning verder. De opnemer ligt inmiddels in het vrieslichaam. Dat lichaam zet uit en vanwege de tegendruk wordt het vrieslichaam zelf intern opgespannen. In deze periode is de verwachting dat alle opnemers een spanningstoename meten. De waterspanning is vanaf dit moment niet meer in hoge mate van belang, omdat de grond bevroren is.

Wat bij DV1 niet is waargenomen maar bij DV2 wel zijn kruipprocessen. Kruip treedt op doordat de spanningen te hoog worden voor het ijs om niet te vervormen. De ijskristallen zullen door de hoge spanningen vloeibaar worden. Het gevolg hiervan is dat de grondspanningen dalen. Kruip is niet alleen afhankelijk van de heersende grondspanning, maar ook van de heersende temperatuur. Deze twee variabelen vormen samen een evenwichtsverhouding. Een zeer lage temperatuur met lage grondspanningen zal niet leiden tot kruip. Een zeer lage temperatuur met hoge grondspanningen eventueel. Een minder lage temperatuur met hoge grondspanningen zal leiden tot kruip.

Kruip is onder laboratoriumomstandigheden te kwantificeren. Met de praktijkmetingen is het erg moeilijk hiervoor kruipconstanten te geven. Dit komt doordat interne vriesopspanning samen met kruip, spanningsveranderingen veroorzaakt. Welke verandering door kruip of vriesopspanning is veroorzaakt is zodoende niet te kwantificeren, maar alleen te constateren. Mogelijk bestaat er nog een tweede oorzaak voor de spanningsverlaging. Op het moment dat het vorstfront langs is geweest en steeds verder voortschrijdt zal een volgend deel van het vrieslichaam gaan uitzetten en opspannen. Het is dan mogelijk dat door die spanningstoename elders de spanning ter plaatse van de opnemer weer daalt. Het nieuw ontstane deel van het vrieslichaam zal meedelen in de totale op het vrieslichaam heersende grondspanningen.

Een voorbeeld van temperatuurafhankelijke kruipprocessen is waar te nemen gedurende de periode van af de start van bevroering tot aan de ontgraving van de loodrechte spanning (SM2-3) en de evenwijdige spanning (SM3-2) van SM3 (bijlage L1).

VRIEZEN-ONTGRAVEN

Observaties

- Radiale interne spanning; SM3-3 en SM4-3 (bijlage L1 en L2) meten beide een interne spanningsafname. Het opspanningseffect is weg door het verdwijnen van de inwendige grondspanning die de ontgraven grond leverde.
- Axiale interne spanning; SM3-2, SM4-2, SC5-1 en SC8-1 (bijlage L1, L2, L3 en L4), meten een spanningstoename. Een directe verklaring is niet voorhanden, maar de inklemming van het vrieslichaam tussen de hoofdtunnels kan daarvoor een passende verklaring zijn. Bij inklemming spelen kruipprocessen een mindere rol.
- SC6-1 meet in tegenstelling tot de verwachting een spanningsafname. SC7-1 een extreem grote spanningstoename. Het is mogelijk dat door de ontgraving een scheur ontstaan in de wand van het vrieslichaam of dat een stuk is afgebrokkeld.
- Interne ringspanning; SM4-1 meet een spanningstoename.

Alle opnemers, behalve SC6-1, meten de verwachte spanningsveranderingen. De spanningstoename bij SC7-1 is extreem groot.

In Tabel 8.4 staan de spanningsveranderingen die optreden gedurende de periode van ontgraving.

Tabel 8.4 Relatieve spanningsveranderingen, afgerond op 5 kPa, die optreden tijdens ontgraven. Aangegeven zijn de spanningsveranderingen van maximum tot minimum of vice versa en niet de waarden ten opzichte van de nulmetingen.

opnemer	richting	spannings- verandering [kPa]	waterspannings- verandering [kPa]	grafieken
SC5-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	60	-	L3
SC6-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	-140	-	L4
SC7-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	1070	-	L5
SC8-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	25	-	L6
SM3-1 grondspanning verticaal	ring	-	-	L1
SM3-2 grondspanning evenwijdig	axiaal	155	-	idem
SM3-3 grondspanning loodrecht	radiaal	-60	-	idem
SM4-1 grondspanning verticaal	ring	530	-	L2
SM4-2 grondspanning evenwijdig	axiaal	175	-	idem
SM4-3 grondspanning loodrecht	radiaal	-100	-	idem

Toelichting

Tijdens de ontgraving treedt hetzelfde fenomeen op als bij DV1. Het vrieslichaam komt onder een hogere belasting te staan. Door het ontgraven en verwijderen van de steun vanuit het hart nemen de radiale spanningen af. Het resterende kleinere vrieslichaam moet nu de axiale en ringspanningen opnemen. Beide zullen daardoor stijgen.

VRIEZEN-BEKLEDEN EN VRIEZEN OP LAGERE CAPACITEIT

Observaties

- Radiale interne spanning; de radiale ontspanning komt tot een einde door de aanwezigheid van het spuitbeton. Aan de binnenzijde van het vrieslichaam is door grotere temperatuuroptename een grotere stijfheidsafname ontstaan dan aan de buitenzijde. Het gevolg hiervan is dat in de beginperiode van de bekledingsperiode de radiale spanningen herverdeeld moeten worden. De radiale spanningen nemen aan de buitenzijde iets toe doordat de spanningen aan de binnenzijde iets afnemen. Netto levert dit een geringe spanningstoename bij SM3-3 en SM4-3 (bijlage L1 en L2).
- Axiale interne spanning; SM3-2, SM4-2, SC5-1 en SC8-1 (bijlage L1, L2, L3 en L6) meten een spanningsafname. Nadat de temperatuur weer daalt neemt de radiale spanning door vriesopspanning weer toe. Bij SM3-2 en SM4-2 is die toename zeer gering. Door de ligging verder vanaf de vrieslansen zijn de temperatuurveranderingen ook zeer klein.
- SC6-1 meet een spanningstoename. Dit gedrag is tot nu toe onverklaarbaar. SC7-1 meet een spanningsafname door het spuitbeton en de stijfheidsverlaging. Daarna neemt de temperatuur af en meet SC7-1 een toename.
- Interne ringspanning; SM3-1 en SM4-1 (bijlage L1 en L2) meten een spanningstoename, gevolgd door een afname. De stijfheidsafname van het totale vrieslichaam neemt eerst af door temperatuuroptename. De ringspanning stijgt, totdat de temperatuur weer afneemt en het vrieslichaam gering opspant. De ringspanning neemt daardoor weer af.

In tabel 8.5 staan de relatieve interne spanningsverandering aangegeven voor de periode ontgraven tot aan vriezen op lagere capaciteit (33%).

Tabel 8.5 Relatieve spanningsveranderinge, afgerond op 5 kPa, die optreden gedurende de periode na ontgraven tot aan start op 33% vriezen. Aangegeven zijn de spanningsveranderingen van maximum tot minimum of vice versa en niet de waarden ten opzichte van de nulmetingen.

opnemer	richting	spanningsverandering [kPa]	waterspanningsverandering [kPa]	grafieken
SC5-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	-60 gevolgd door 50	-	L3
SC6-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	340 gevolgd door -300 gevolgd door 30	-	L4
SC7-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	-500 gevolgd door 150	-	L5
SC8-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	15	-	L6
SM3-1 grondspanning verticaal	ring	-	-	L1
SM3-2 grondspanning evenwijdig	axiaal	50	-	idem
SM3-3 grondspanning loodrecht	radiaal	-160	-	idem
SM4-1 grondspanning verticaal	ring	535 gevolgd door -310	-	L2
SM4-2 grondspanning evenwijdig	axiaal	30	-	idem
SM4-3 grondspanning loodrecht	radiaal	-175	-	idem

Toelichting

In deze periode wordt met lagere vriescapaciteit gevoren. De periode 'bekleden en vriezen op lagere capaciteit' kenmerkt zich voor het gehele vrieslichaam door een periode van temperatuurstijging, gevolgd door een temperatuurdaling. Dit komt tevens door opwarming vanuit het inmiddels ontgraven hart van het vrieslichaam. Aan de binnenzijde van het vrieslichaam stijgt de temperatuur sneller dan aan de buitenzijde. Het vriezen gaat door, met als gevolg dat uiteindelijk de temperatuur weer daalt. Temperatuurveranderingen veroorzaken stijfheidsveranderingen. Stijfheidsveranderingen veroorzaken spanningsveranderingen.

In de periode van bekleden wordt eerst het spuitbeton aangebracht. Vanaf het moment van aanbrengen en uitharden van het spuitbeton vormt zich een stijf betonlichaam binnen het stijve vrieslichaam. Dit betonlichaam vormt als het ware coaxiaal een stijve cilinder in het cilindervormige vrieslichaam. De binnenste cilinder, het spuitbeton, is relatief warm door de open verbinding met warme lucht vanuit de tunnel en de hydratatiewarmte.

Dit resulteert in een opwarming van het hart van het vrieslichaam. De stijfheid van het betonlichaam en de opwarming van binnenuit zorgen voor interne spanningsveranderingen. De stijfheid van het vrieslichaam neemt door opwarming af. Het uitgeharde spuitbeton kan wellicht een klein deel van de axiale en radiale spanningen overnemen.

DOOIEN

Observaties

- Radiale interne spanningsverandering; SM3-3 en SM4-3 meten conform de verwachting een afname van de spanningen (bijlage L1 en L2).
- Axiale interne spanningsverandering; SM3-2, SM4-2, SC5-1 en SC8-1 (bijlage L1, L2, L3 en L6), meten alle een spanningsafname. SC6-1 en SC7-1 meten ook een spanningsafname. SC6-1 meet in het begin nog een spanningstoename. Dit kan een spanningstoename (schrikeffect) zijn dat ontstaat door de temperatuurstijging. Het schrikeffect ontstaat door de herverdeling van spanningen met een in stijfheid veranderend vrieslichaam als gevolg van een temperatuurstijging.

- Interne ringspanning; SM4-1 meet een toename van de ringspanning. Dit komt door de algehele ontspanning van het vrieslichaam, waardoor het vrieslichaam snel krimpt en de ringspanningen omhoog schieten. Na verloop van tijd neemt ook de ringspanning af, door algehele relaxatie.

In tabel 8.6 staan de relatieve interne spanningsverandering aangegeven voor de periode van dooi (vriesmachine staat uit).

Tabel 8.6 Relatieve spanningsveranderingen, afgerond op 5 kPa, die optreden gedurende de dooiperiode. Aangegeven zijn de spanningsveranderingen van maximum tot minimum of vice versa en niet de waarden ten opzichte van de nulmetingen.

Opnemer	richting	spannings- verandering [kPa]	waterspannings- verandering [kPa]	grafieken
SC5-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	-275	340	L3
SC6-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	300 gevolgd door -560	230	L4
SC7-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	-325	-70 gevolgd door 280	L5
SC8-1 grondspanning evenwijdig	axiaal	-280	335	L6
SM3-1 grondspanning verticaal	ring	-	-	L1
SM3-2 grondspanning evenwijdig	axiaal	-535	260	idem
SM3-3 grondspanning loodrecht	radiaal	-330	260	idem
SM4-1 grondspanning verticaal	ring	415 gevolgd door -890	215	L2
SM4-2 grondspanning evenwijdig	axiaal	-490	215	idem
SM4-3 grondspanning loodrecht	radiaal	-440	215	idem

Toelichting

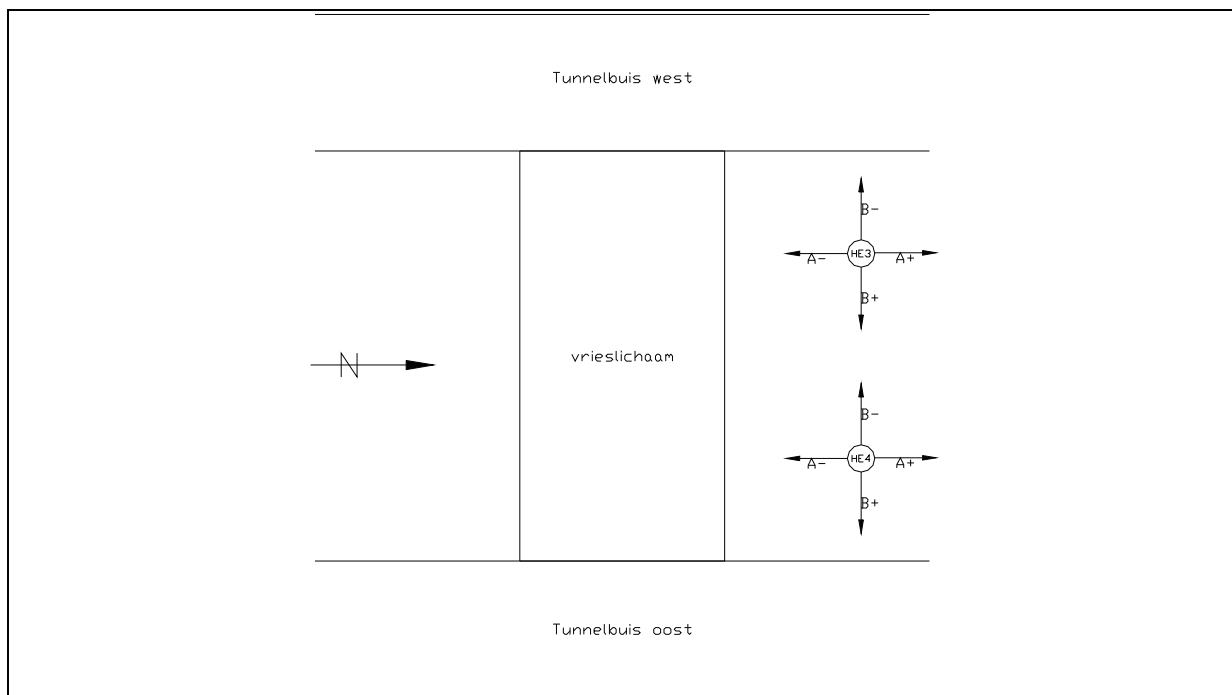
In deze periode wordt de vriesinstallatie uitgezet, met als gevolg een temperatuuroptocht en een stijfheidafname van het gehele vrieslichaam. De spanningsveranderingen verlopen daardoor conform de temperatuurverhoging, op geleidelijk afnemende wijze.

8.4. DEFORMATIEVERLOOP

Met hellingmeetbuizen en extensometers worden de radiale deformaties van de grond (nabij het vrieslichaam) tijdens het vriezen en dooien gemeten. De extensometers meten de radiale deformatie aan de bovenkant van het vrieslichaam en de hellingmeetbuizen aan de zijkant. De hellingmetingen worden in twee richtingen uitgevoerd, de A- en B-richting:

De A-richting is loodrecht op het vrieslichaam.

De B-richting is evenwijdig aan het vrieslichaam.



Figuur 8.1 Positie van HE3 en HE4 t.o.v. DV2

De extensometers bevinden zich recht boven en in het vrieslichaam, op de hartlijn. Elke extensometer bestaat uit 4 packers die afzonderlijk met het maaiveld verbonden zijn door middel van een stang. Op het maaiveld staan de opnemers die de verplaatsing van de stang registreren.

Bij dwarsverbinding 2 worden, omdat in klei gevoren wordt, grote deformaties verwacht. Uit de metingen blijkt dat de gemiddelde maximale deformatie ter plaatse van EX3-1 en EX4-1 (de extensometerpackers die het dichtst tegen de vrieslansen aanliggen), respectievelijk 46 en 48 mm bedragen. De hellingmetingen geven maxima van respectievelijk 31 en 36 mm voor HE3 en HE4 in de A-richting. In de B-richting van HE3 en HE4 worden maximale deformaties gemeten van respectievelijk -10 mm en -5 mm (Bijlage N1 en N2).

In bijlage N1-N6 worden de meetresultaten van de extensometers en de hellingmeetbuizen weergegeven in grafieken.

Bijlage

- N1 “Extensometer 3 (EX3) » Absolute verticale deformatie versus Temperatuur en Datum”
 - N2 “Extensometer 4 (EX4) » Absolute verticale deformatie versus Temperatuur en Datum”
 - N3 “Hellingmeetbuis 3, A richting (HE3A) » Absolute gronddeformatie op dieptes NAP -24 t/m -32 m versus Datum”
 - N4 “Hellingmeetbuis 3, B richting (HE3B) » Absolute gronddeformatie op dieptes NAP -24 t/m -32 m versus Datum”
 - N5 “Hellingmeetbuis 4, A richting (HE4A) » Absolute gronddeformatie op dieptes NAP -24 t/m -32 m versus Datum”
 - N6 “Hellingmeetbuis 4, B richting (HE4B) » Absolute gronddeformatie op dieptes NAP -24 t/m -32 m versus Datum”
-

8.4.1. EXTENSOMETERS

De metingen van de extensometers worden uitgedrukt in een verkorting. De packers zijn alle afzonderlijk door middel van een stang verbonden met de opnemer. De opnemers staan op maaiveldniveau en registreren de lengte van de stang. Komen packer en opnemer dicht bij elkaar, dan wordt een verkorting gemeten (verkorting is negatief).

Het gehele deformatiepatroon zoals dat te zien is bij de extensometers wordt gedomineerd door vier effecten: maaiveldzettingen, vorstheffing, ontgravingsdeformaties en restzettingen door veranderde structuur van de klei (plastische vriesdeformatie).

MAAIVELDZETTINGEN

Maaiveldzettingen zorgen voor een verkorting. De grond wordt samengedrukt en packer en opnemer komen dicht bij elkaar. Kenmerkend voor dit effect is dat de mate van deformatie voor alle packers ongeveer gelijk moet zijn omdat niet de packers afzonderlijk omhoog komen, maar omdat de opnemers als geheel naar beneden komen.

In de grafieken van EX₃ en EX₄ (Bijlage N₁ en N₂) is duidelijk te zien dat de deformaties al beginnen voordat gevoren wordt. Dit is te wijten aan de extra overhoogte en grondverbetering die ter plaatse van DV₂ is aangebracht. De gemeten einddeformatie van de extensometers geven maximale verticale deformatie van 48 mm aan. Deze deformatie is gemeten in het onderste deel van de meetbuis dicht tegen het vrieslichaam aan. Er kan dus sprake zijn van een consolidatie-effect door de vries-dooi cyclus. Het effect van de ontgraving is hier moeilijk exact vast te stellen.

VORSTHEFFING

Observaties

Het deformatiepatroon vertoont een zelfde soort patroon als bij DV₁. Door bevroering zet het vrieslichaam uit. Dit zorgt voor een verkorting in de meting van de extensometers. De verkorting verloopt dan globaal in de verticale richting. De helling van de verkorting verloopt omgekeerd evenredig met de helling van de temperatuurcurve (bijlage N₁ en N₂).

Toelichting

De mate van vorstheffing is afhankelijk van de temperatuur (de afstanden tot het vrieslichaam) en geeft zodoende verschillende waarden voor de verschillende packers. Naarmate de packer dicht bij of in het vrieslichaam ligt worden de deformaties groter. Een packer hoeft diensgevolge niet in het vrieslichaam te liggen om een deformatie te meten. Het vrieslichaam zet immers uit en veroorzaakt daardoor ook een deformatie in de omringende onbevroren grond.

ONTGRAVINGSDEFORMATIE

In de curven van EX₃ en EX₄ neemt de deformatie af op het moment dat de ontgraving begint. Door contractie van een cilindervormig vrieslichaam wordt de vorstheffing tenietgedaan. Het is duidelijk te zien dat de deformatie het meest afneemt bij de onderste extensometerpackers EX₃₋₁ en EX₄₋₁. De andere packers reageren in naar boven afnemende mate op de ontgraving (bijlage N₁ en N₂).

8.4.2. HELLINGMEETBUIZEN

A-richting ($\perp$ vrieslansen)

Ten aanzien van de hellingmeetbuizen zijn duidelijk deformaties waar te nemen. Zoals in bijlage N3 en N5 te zien is, is de horizontale deformatie per zijde van het vrieslichaam kleiner dan de totale verticale deformatie aan de bovenkant van het vrieslichaam.

De deformaties zijn over de hoogte van 24 m tot 32 m onder maaiveld niet constant en variëren in maximale deformatie tussen de 15 en 36 mm. De deformaties volgen hetzelfde patroon als bij DV1, namelijk de maximale deformaties worden gemeten ter hoogte van de buitenste 3 vrieslansen. De grote deformaties in klei gedurende de grondbevriezing worden verklaard door vorstuitzetting en ijslensvorming.

B-richting ($//$ vrieslansen):

De deformaties in de B-richting laten een heel ander patroon zien (bijlage N4 en N6). HE3B en HE4B lijken niet op elkaar. Wel zijn aanzienlijke deformaties gemeten, zeker in vergelijking met DV1, maar niet volgens een patroon zoals bij HE3A en HE4A. Opmerkelijk is de grote deformatie in de periode van dooien. Met name HE4B laat grote deformaties zien. De deformaties worden verklaard door vorstheffing in de richting loodrecht op de isothermen.

Ook bij de hellingmeetbuizen is een restdeformatie waargenomen van rond de 15 mm (in A richting). Dit heeft dezelfde oorzaak als de gemeten restzettingen bij de extensometers.

Zand vs klei

Het verschil tussen zand en klei is duidelijk. Zand komt in de dooifase terug in oorspronkelijke staat en bij klei treden blijvende deformaties op.

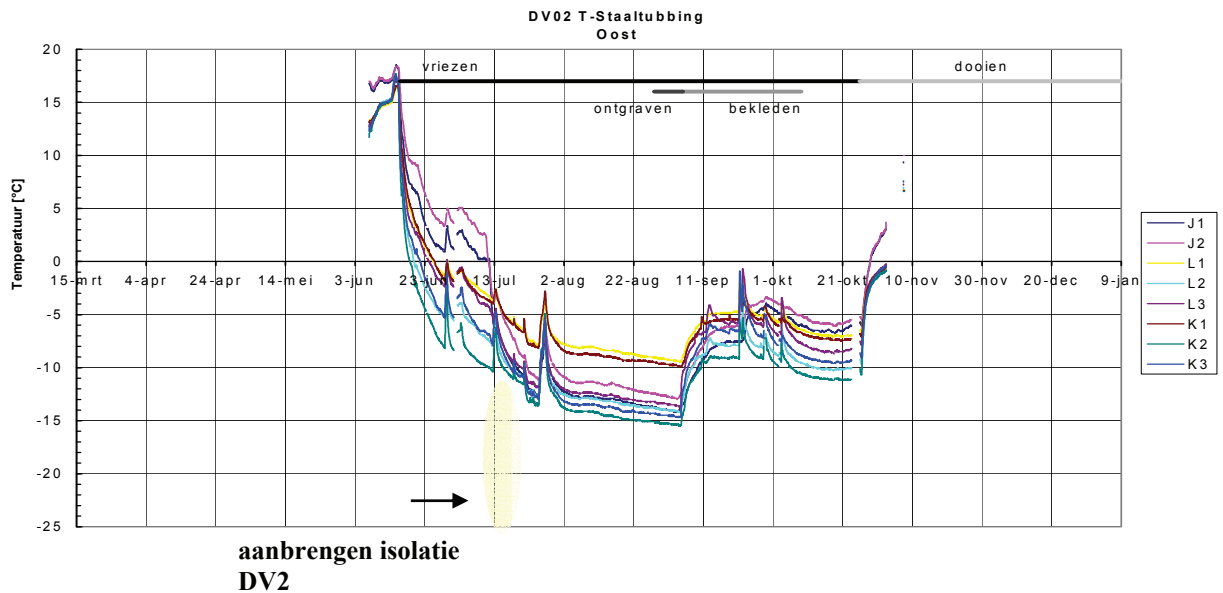
De gegevens in de bijlagen N3-N6 zijn gecorrigeerd voor horizontale verplaatsingen die aan het maaiveld optreden.

8.5. TEMPERATUURONTWIKKELING VAN DE HOOFDTUNNELS BIJ DV2

De temperaturen van de hoofdtunnels zijn ook bij DV2 gemeten om de ijsaansluiting gedurende de gehele bouwperiode te kunnen volgen.

8.5.1. TEMPERATUURONTWIKKELING VAN DE OOSTBUIS BIJ DV2

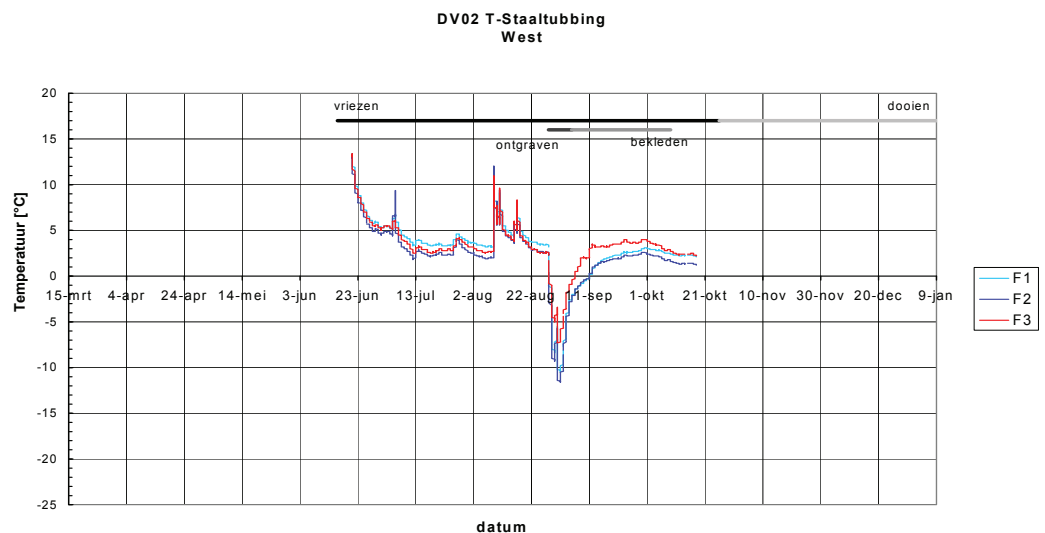
Van DV2 is aan de oostkant de temperatuur van ring 3 gemeten met behulp van thermokoppels. De temperatuur werd elk uur automatisch afgelezen op de plaatsen J1 en J2, K1 tot en met K3 en L1 tot en met L3. Deze plaatsen zijn in Bijlage C1 aangegeven. De resultaten van deze metingen zijn grafisch weergegeven in Figuur 8.2. Net als bij DV1 zijn er pieken te zien in het temperatuurverloop (als gevolg van storingen van de vriesapparatuur).



Figuur 8.2 Temperatuur van de staaltubbing oostbuis DV2 op verschillende posities.

8.5.2. TEMPERATUURONTWIKKELING VAN DE WESTBUIJS BIJ DV2

De temperaturen van de tunnelsegmenten aan de westzijde zijn geregistreerd door KMW (bijlage E4). De meetpunten A-H zijn in bijlage C5 aangegeven. In de temperatuurmetingen van sensoren E-H is de temperatuurdaling door de aangebrachte isolatie goed waar te nemen. Bij DV2 is op 31 augustus 2000 droogijs aangebracht aan de westbuis bij DV2 (fig. 8.3). In het temperatuurverloop is direct na deze datum een duidelijke daling waar te nemen.



Figuur 8.3 Temperatuur van de stalen tunnelsegmenten bij de westbuis van DV2.

8.6. DEFORMATIE VAN DE HOOFDTUNNELBUIZEN BIJ DV2

Deformatie van de hoofdtunnelbuizen DV2 worden in de volgende paragrafen besproken:

1. verplaatsingen – westbuis (par. 8.11.1)
2. convergentiemetingen – oost- en westbuis (par. 8.11.2)

8.6.1. VERPLAATSINGEN VAN DE HOOFDTUNNELBUIZEN BIJ DV2

Van DV2 is de vervorming van de ringen 1 tot en met 7 gemeten. De vervorming is in de tijd gemeten op de plaatsen A01 tot en met A32 (bijlage C2). De vervormingen op de meetpunten A01, A02, A04 en A05 zijn weergegeven in fig. 8.4 (en Bijlage O). Ook hier zijn voor de duidelijkheid de meetpunten verbonden door rechte lijnen en is voor meetpunt A01 aan de westkant een regressielijn (vierdegraads polynoom) toegevoegd. De hier getoonde rij A-punten was de rij die zich het meest boven aan de tunnelbuis bevond. Een vergelijkbare grafiek van een meer aan de zijkant van de tunnelbuis liggend rijtje A-punten staat in Fig. 8.5 (en Bijlage O).

De ruis in de metingen ligt in dezelfde grootteorde als bij DV1, maar doordat de vervormingen groter zijn, is de ruis minder goed zichtbaar.

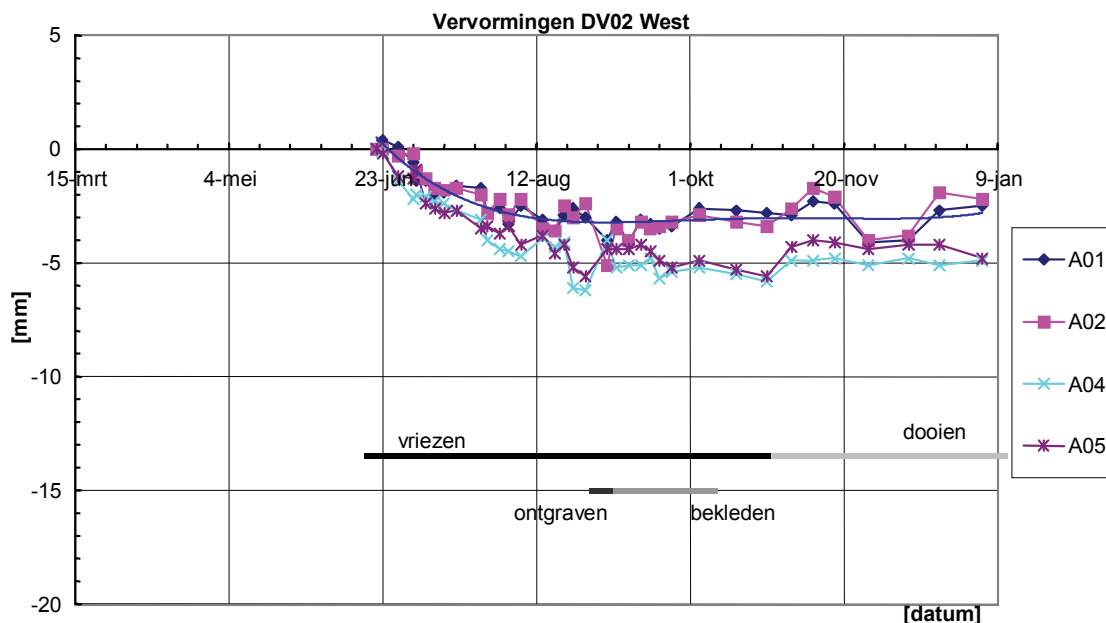
Net als bij DV 1 is er een trend te herkennen. Meteen na het begin van de metingen loopt de lijn omlaag. Deze trend is bij DV2 sterker dan bij DV1. Uit fig. 8.4 blijkt dat het sterk vervormen van de tunnelwand een lokaal effect is dat alleen optreedt dicht bij de vrieslansen: in meetpunt A10 is wel sprake van indrukking, maar deze verloopt vloeiend in de tijd. De punten A11, A13 en A14 worden wel drie keer zo ver ingedrukt op het moment dat de temperatuur de laagste waarde bereikt. Dit is tevens het tijdstip waarna de ontgraving plaats vindt.

Na het oplopen van de temperatuur zakt deze vervorming weer snel. A10 is een punt dat buiten de cirkel met vrieslansen ligt, de punten A11, A13 en A14 liggen daarbinnen.

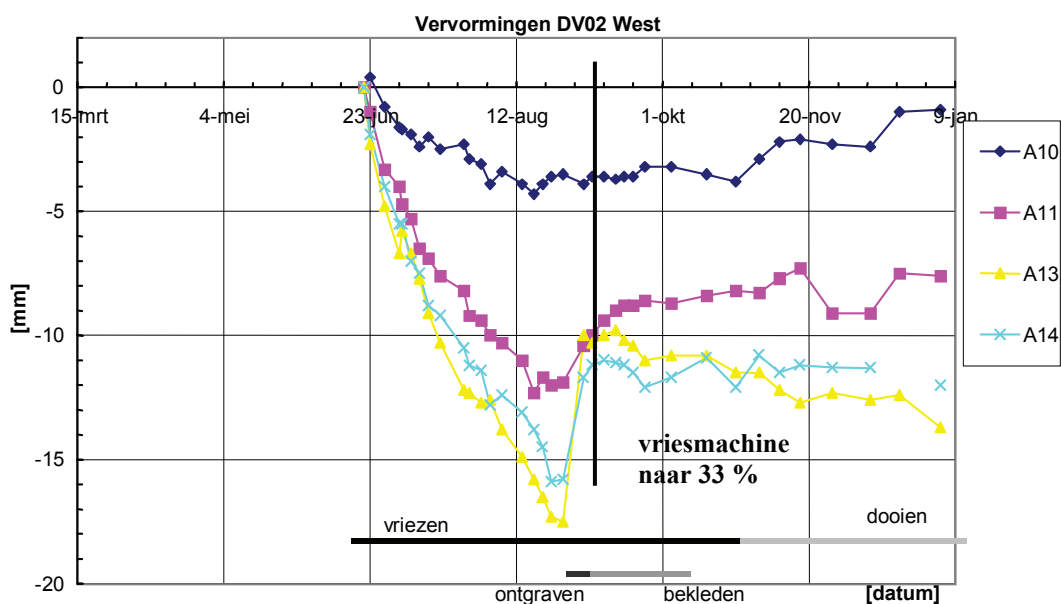
Ook voor DV2 zijn 2D-plots gemaakt. Deze zijn verzameld in fig. 8.6 (en bijlage P). In deze plots zijn naast de A-punten tevens de C-punten gebruikt. Net als bij DV1 is te zien dat de grootste vervormingen lokaal optreden, iets binnen de cirkel van de vrieslansen.

Door de grotere vervormingen ten opzichte van die bij DV1 is de invloed van de ruis minder. Er is duidelijk een trend zichtbaar dat in het middelpunt van de cirkel van de vrieslansen de vervorming kleiner is dan er omheen. Dit komt tot uiting in de figuren van Bijlage P waarin de vervorming als functie van de afstand staat uitgezet. Deze hebben allen de typische “kamelvorm”.

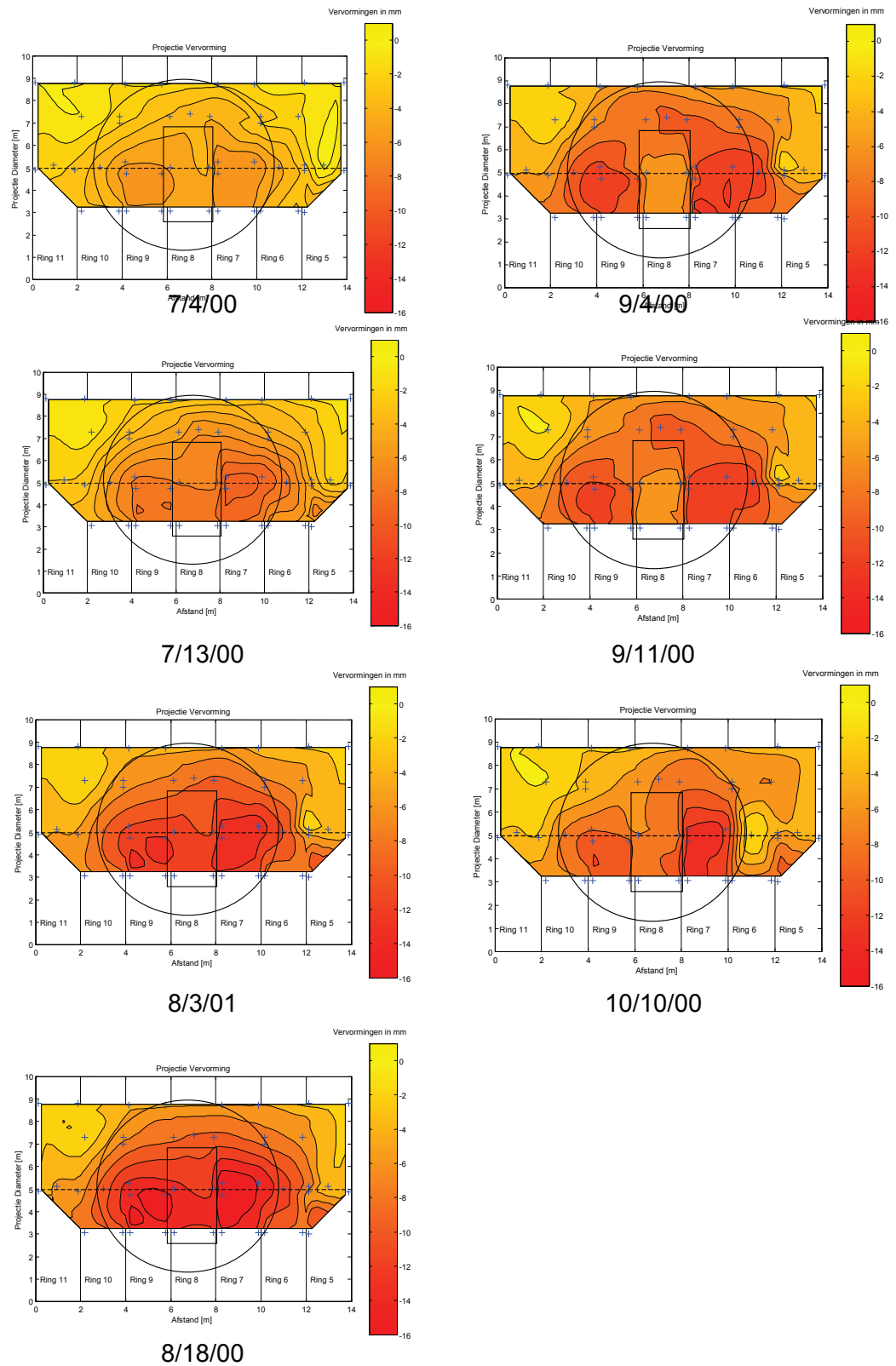
De meetnauwkeurigheid van de verplaatsingen van de tunnelsegmenten wordt (door KMW) geschat op ca. 2 mm. De verplaatsingen zoals gemeten bij DV2 bedragen maximaal 18 mm en zijn dus als significant te waarden.



Figuur 8.4 Vervormingen A-punten bij DV2, west, A-punten A01, A02, A04 en A05.



Figuur 8.5 Vervormingen bij DV 2, west, A-punten A10, A11, A13 en A14.



Figuur 8.6 Verzamelde 2D-plots van verplaatsingen van de tunnelsegmenten van westbuis bij DV2

8.6.2. STEEKMETINGEN VAN DE WEST- EN OOSTBUIS BIJ DV2

Naast de metingen van de A-punten zijn steekmetingen van de diameter van de tunnelbuizen gedaan.

De steekmetingen zijn horizontale metingen van de diameter van de hoofdtunnel. Het zijn metingen die zijn uitgevoerd tussen een vast punt links in de tunnel naar een vast punt rechts in de tunnel.

Met een nauwkeurig meetlint werd om de ongeveer twee weken de afstand tussen de twee haken gemeten. Het meetlint was gemaakt van wolfram waardoor de invloed van de temperatuur verwaarloosbaar klein was. De kracht waarmee het meetlint tussen de metalen ogen werd opgespannen was steeds gelijk. Met deze steekmetingen wordt niet de tunneldiameter afgelezen maar de verandering van de diameter. De nauwkeurigheid van de meting werd door KMW geschat op $\pm 0,1$ mm. Het eerste meetpunt was de nulmeting.

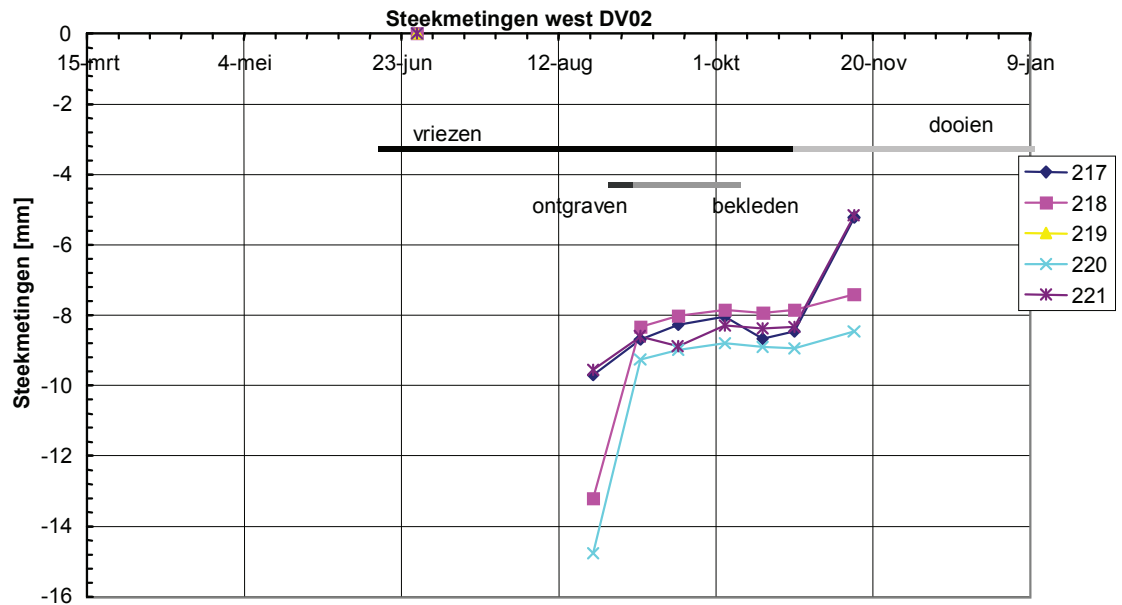
De meetreeksen 217-221 zijn het resultaat van deze meetactiviteit bij DV2 (Fig. 7.9 en 7.10).

Het nulpunt is gemeten op 28 juni 2000. Het verloop van de convergentie in de tijd voor meetpunt 217 tot en met 221 is weergegeven in Fig. 8.7 en 8.8.

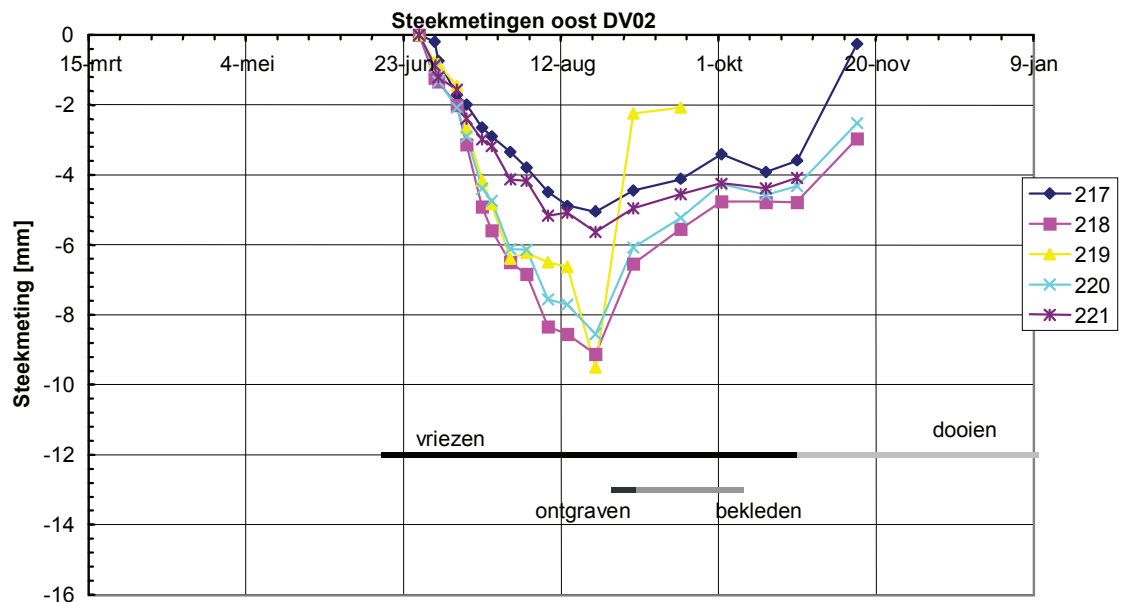
Na de start van het vriezen neemt de horizontale diameter van de oosttunnel sterk af. Na verloop van tijd neemt deze licht af tot 10 mm. Opmerkelijk is dat de steekmeting van de oostkant van DV2 kleiner wordt wanneer de dooiperiode start (fig. 8.8). De steekdiameter lijkt terug te lopen naar zijn startwaarde van voor de vries-dooi cyclus.

De serie steekmetingen van DV1 is incompleet (fig. 8.7). In deze serie is wel te zien dat de diameter van de westtunnel gedurende het dooiproces weer toeneemt en stabiliseert in zijn positie van voor de vries-dooi cyclus.

Met de voor dit onderzoek uitgevoerde metingen zijn alleen de vervormingen van de tunnelbuis gemeten. De rekken en spanningen in het beton en de wapening zijn hiermee niet bepaald. Uit de hier uitgevoerde metingen is daarom geen verband te leggen tussen de belasting op het beton en de wapening en het vriezen van de grond en het graven. Om dit te kunnen bereiken moet gebruik worden gemaakt van eindige elementen berekeningen. Dit valt buiten het kader van dit onderzoek.



Figuur 8.7 Steekmetingen DV 2, west



Figuur 8.8 Steekmetingenmetingen DV 2, oost

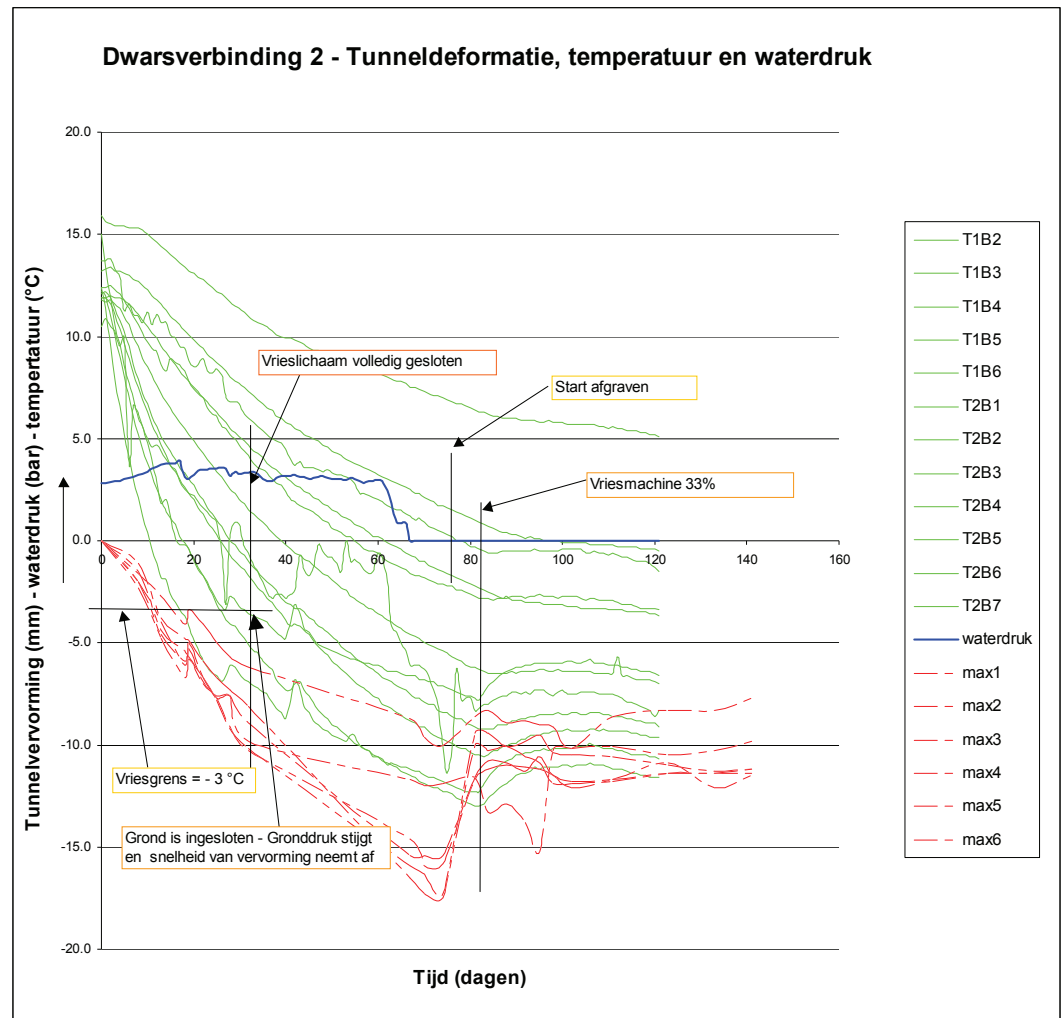
8.7. RELATIE WATERDRUK EN TUNNELDEFORMATIE DV2

In fig. 8.9 zijn de gegevens van de temperaturen van meetlansen T1 en T2, de waterdruk bij het veiligheidsventiel, alsmede de verplaatsing van de tunnelsegmenten van de westelijke tunnel bij DV2 geplot. De verplaatsing van de tunnelsegmenten zijn gemiddelde waarden. De maximale verplaatsing vindt plaats gedurende de periode voor de ontgraving.

Bij klei er ook een relatie tussen waterdruk gemeten in het hart van de dwarsverbinding en de tunneldeformatie aangetroffen. Op dag 18 wordt door open een van het overdrukventiel plastische klei geproduceerd. In de tunnelverplaatsing wordt direct een vermindering gemeten (fig. 8.9).

In het verdere verloop van het vriesproces van klei bij DV2 wordt geen directe relatie waargenomen tussen de waterdruk en de tunneldeformatie.

De temperatuurcurve in fig. 8.9 die ander curves doorkruist wijst op een lokale afwijkend en hogere temperatuurontwikkeling. Dit is waarschijnlijk de oorzaak van een verhoogde temperatuur die veroorzaakt wordt door warmteaanvoer vanuit de hoofdtunnelbuis.



Figuur 8.9 Overzicht van temperatuurmetingen van de oostbuis (T#B#), tunnel vervormingen van de westbuis (max#) en de waterdruk van het overdrukventiel DV2 (Van der Meijden, 2001).

8.8. SAMENVATTING OBSERVATIES DV2

De observaties die in deze paragraaf worden besproken hebben betrekking op het bevroren grondmassief in de klei van het Laagpakket van Boom bij DV2 van de Westerscheldetunnel. De klei heeft een zeer lage waterdoorlatendheid.

Betrouwbaarheid van metingen van grondspanningen:

De metingen van de stress monitoring stations en de hellingmeetbuizen worden net als bij DV1 als voldoende betrouwbaar beschouwd om processen in de grond te bepalen.

De betrouwbaarheid van de spade cellen is onvoldoende en metingen worden dan ook slechts meegenomen bij de kwalitatieve interpretatie.

De betrouwbaarheid van de waarde van de waterdrukmetingen met VW, SC en SM in het kleimassief is waarschijnlijk niet groot vanwege de zeer geringe water-doorlatendheid van de klei van het Laagpakket van Boom. Tijdens de periode dat de waterspanningsmeters bevroren zijn, is geen betrouwbare interpretatie van de waterspanning mogelijk.

Grondspanningen:

1. Spanningsverloop:

Gedurende de verschillende vriesfasen wordt de volgende spanningsveranderingen waargenomen:

Gedurende vriezen tot aan 0 °C:

- radiaal: spanningstoename met 400 kPa (afkoeling en bevriezing klei);
- axiaal: spanningstoename met 625 kPa (afkoeling en bevriezing klei).

Gedurende vriezen vanaf 0 °C tot aan ontgraven:

- radiaal: spanningstoename met 545 kPa gevolgd door spanningsafname met 120 kPa (vriesopspanning gevolgd door kruip of een herverdeling van spanning);
- axiaal: spanningstoename gevolgd door spanningsafname met maximaal 380 kPa (vriesopspanning gevolgd door kruip).

Gedurende vriezen/ontgraven:

- radiaal: spanningsafname van 60 kPa (relaxatie a.g.v. ontgraving);
- axiaal: spanningstoename met 175 kPa (opspanning tussen hoofdtunnels en wegvallen ondersteuning van het hart).

Gedurende dooi:

- radiaal: spanningsafname;
- axiaal: spanningsafname.

De grondbevriezing van klei heeft in vergelijking met grondbevriezing van zand veel grotere spanningsveranderingen tot gevolg.

2. Waterspanning in het hart

De waterspanning neemt gedurende de eerste fase van de grondbevriezing toe tot meer dan 100 kPa. Aangenomen mag worden dat de klei in het hart dan nog niet bevroren is.

Ontgraven en bekleden

De toename in verticale spanningen neemt gedurende de periode van ontgraven en bekleden meer toe dan gedurende de periode van grondbevriezing. Hetzelfde spanningstoename gedurende de ontgraving en de bekleding was zichtbaar bij DV1.

Sputbeton

Als gevolg van het aanbrengen van het spuitbeton treden er in een korte periode temperatuur- en spanningsveranderingen op (zowel toename als afname). Hier speelt de toegevoegde stijfheid van het spuitbeton en de verlaagde stijfheid van het bevroren grondlichaam (als gevolg van temperatuurverhoging) een rol.

Gronddeformatie:

1. Maaiveldzetting:

Ook bij DV2 wordt het deformatiepatroon boven het bevroren grondmassief aantoonbaar beïnvloed door maaiveldzettingen, vorstheffing en ontgraving en vries-dooi consolidatie.

2. Hellingmeetbuizen:

De maximale horizontale deformatie buiten het bevroren grondlichaam van DV2 bedraagt maximaal 36 mm in de richting loodrecht op de dwarsverbinding. In de richting evenwijdig aan het bevroren grondmassief wordt slechts 10 mm gemeten.

Temperatuurvariaties van de grond:

Als gevolg van temperatuurvariaties worden veranderingen in spanningen gemeten. Temperatuurvariaties hebben een verandering van elasticiteit tot gevolg in het bevroren grondmassief. Deze hebben vervolgens significante spannings-veranderingen tot gevolg.

Verplaatsingen tunnelsegmenten:

Verplaatsingen van tunnelsegmenten zijn geregistreerd gedurende de gehele aanlegperiode, direct na aanzetten van de vriesinstallatie.

De verplaatsingen van hoofdtunnelsegmenten bij de aanleg van DV2 worden veroorzaakt door de grondbevriezing en bedroegen maximaal 18 mm. De axiale grondspanningen gedurende de vriezen-ontgraven periode bedroeg op dat moment ca. 1000 kPa.

De grootste verplaatsingen van de tunnelsegmenten treden op in de segmenten waarin de vrieslansen geplaatst zijn ('kamelvorm' van deformatiegrafieken).

De verplaatsingen van de tunnelsegmenten verminderen significant wanneer de vriesinstallatie naar 33% terug wordt gezet.

Gedurende grondbevriezing convergeerde de hoofdtunnelwand maximaal 18 mm naar binnen.

Gedurende de vriesfase worden de tunnelsegmenten naar binnen verplaatst. Gedurende de dooifase wordt een groot deel van de deformatie weer opgeheven doordat de tunnelsegmenten weer op hun oude positie terigkeren. Een deel van de segmenten ter hoogte van de as van de dwarsverbinding behoudt een blijvende deformatie met een positie (binnen de meetperiode). De resterende deformatie van de tunnelsegmenten bedraagt dan enkele mm's richting de as van de hoofdtunnel.

De verplaatsingen van de tunnelsegmenten bij DV2 (in klei) worden zowel beïnvloed door de grondbevriezing als door de ontgraving van de dwarsverbinding.

Bij DV2 treedt een verschil in deformatie van de tunnelsegmenten tussen de oostbuis en de westbuis. De oostbuis ondervindt minder deformatie dan de westbuis vanwege de verschillen in doorvoering van de vrieslansen door de tunnelwanden. In de oostbuis, waar de vrieslansen door de tunnelwand zijn gevoerd, bedraagt de deformatie ongeveer de helft in vergelijking met de westbuis. In de westbuis lopen de vrieslansen slechts tot aan de buitenzijde van de hoofdtunnel waardoor een temperatuurgradiënt ontstaat loodrecht op de tunnelwand. Deze temperatuurgradiënt veroorzaakt een component van vorstspanning.

9. VERGELIJKING F100-VELDMETINGEN MET 3D-VORSTHEFFINGSPROEVEN

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de F100 praktijkmetingen Westerscheldetunnel DV1 en DV2 vergeleken met de resultaten van laboratorium 3D-vorstheffingsproeven met zand en klei die zijn uitgevoerd voor de Groene Hart tunnel en de Westerscheldetunnel. Meer informatie over deze laboratoriumproeven is te vinden in Hoofdstuk 5 van dit rapport en in TNO-NITG (2000).

9.1. VERGELIJKING ZAND EN KLEI

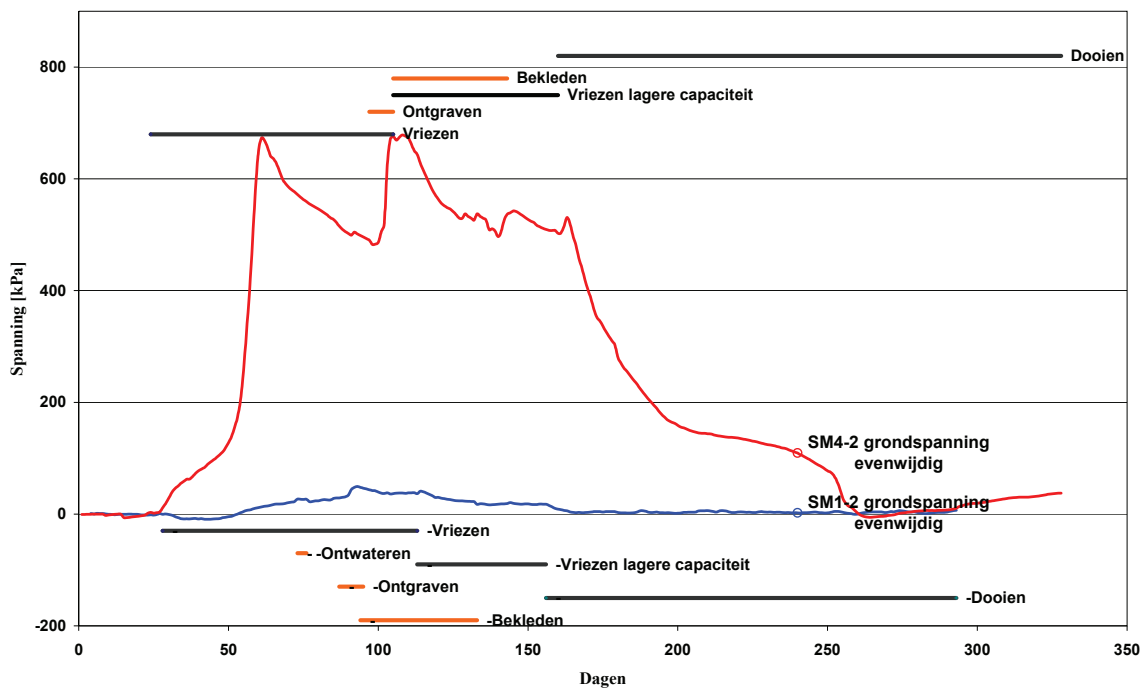
In deze paragraaf wordt in grafieken de ontwikkeling van grondspanning en deformatie bij de grondbevriezing van de dwarsverbinding 1 en – 2 (resp. zand en klei) met elkaar vergeleken.

De meetcurves van zand staan met blauw aangegeven; van klei in rood.

In tabel 9.1 staan significante verschillen en overeenkomsten samengevat die gedurende de grondbevriezing zijn opgetreden.

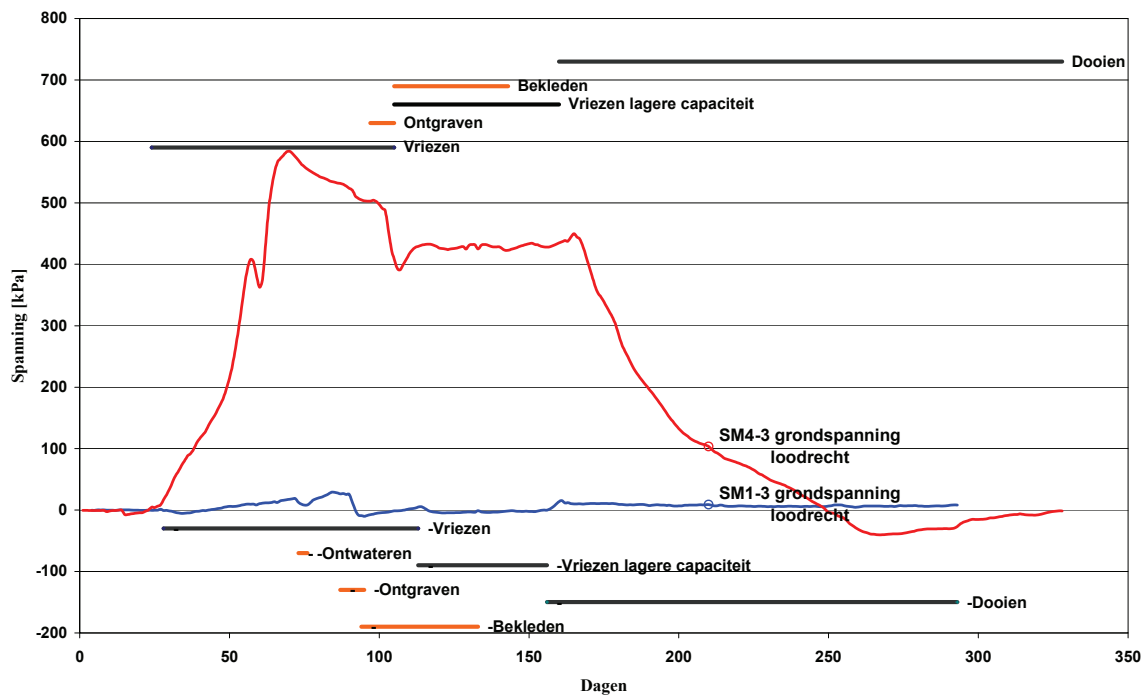
- | | |
|-----------|---|
| Fig. 9.1: | Vergelijking relatieve grondspanningen evenwijdig aan de dwars-verbinding |
| Fig. 9.2: | Vergelijking relatieve grondspanningen loodrecht op de dwars-verbinding |
| Fig. 9.3: | Vergelijking relatieve grondspanning verticaal langs de dwars-verbinding |
| Fig. 9.4: | Vergelijking deformaties boven de dwarsverbinding |

Vergelijking relatieve grondspanningen evenwijdig aan de dwarsverbinding (SM1 en SM4)
Verskil tussen DV1 (zand) en DV2 (Boomse klei)



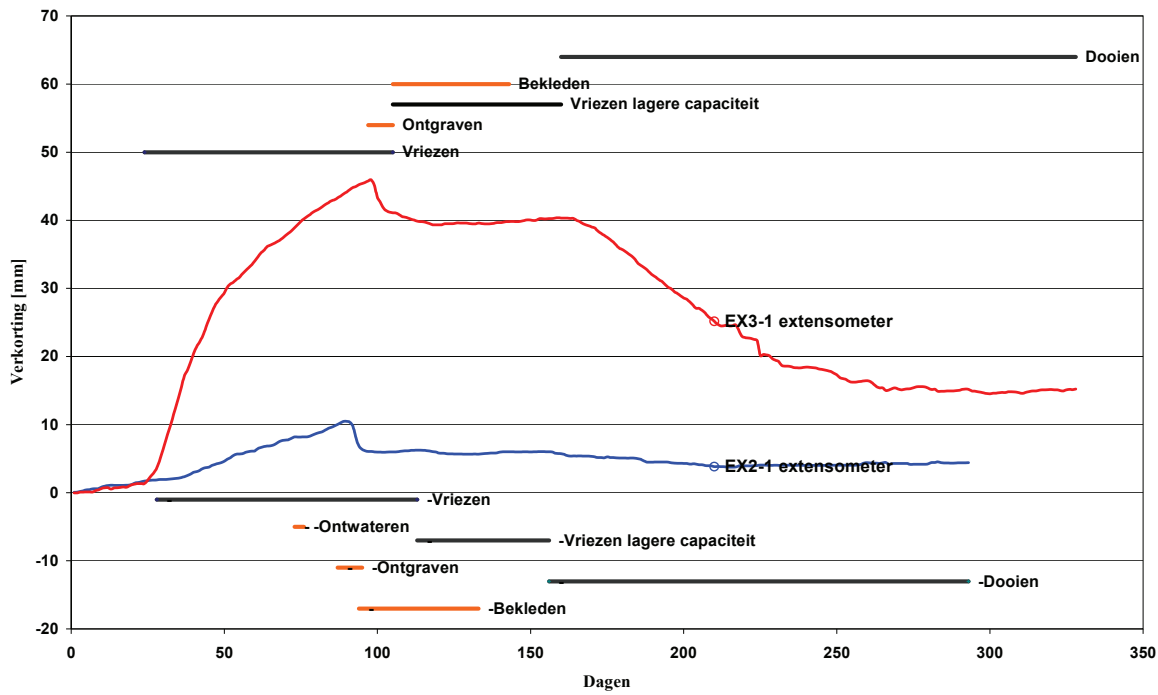
Figuur 9.1 Vergelijking grondspanningen evenwijdig aan de vrieslansen.

Vergelijking relatieve grondspanningen loodrecht op de dwarsverbinding (SM1 en SM4)
Verskil tussen DV1 (zand) en DV2 (Boomse klei)



Figuur 9.2 Vergelijking grondspanningen loodrecht op de vrieslansen.

Vergelijking deformaties boven de dwarsverbinding (EX2 en EX3)
Verskil tussen DV1 (zand) en DV2 (Boomse klei)

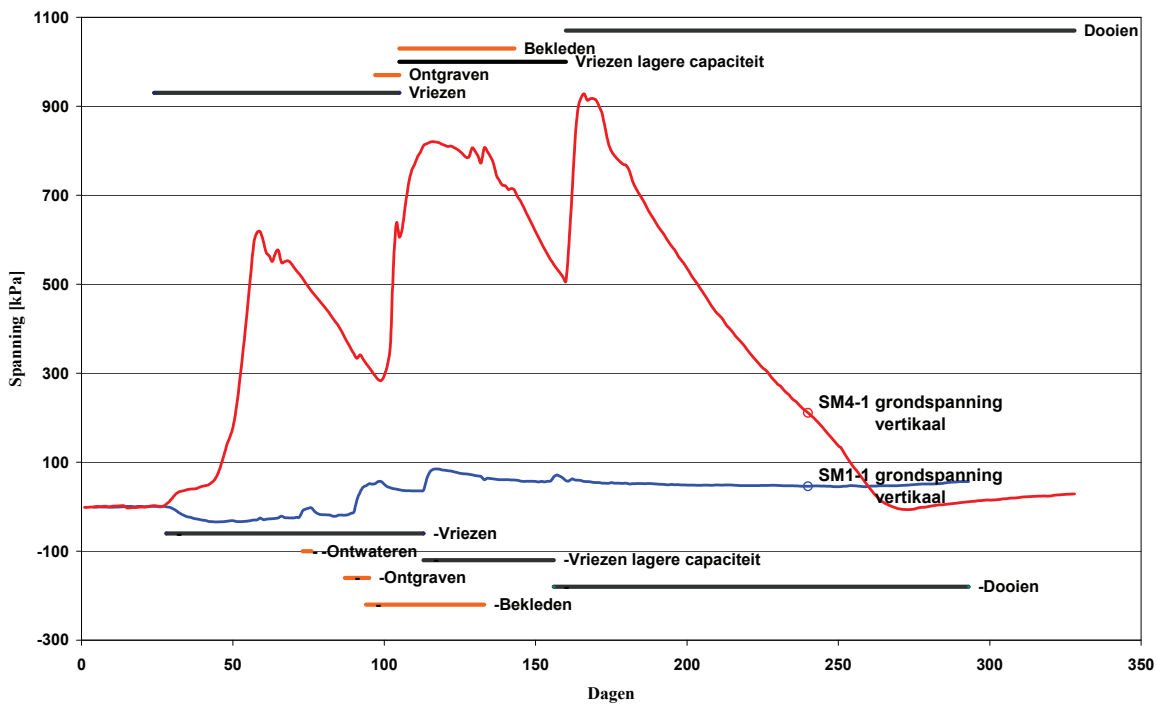


klei

zand

Figuur 9.3 Deformaties boven de dwarsverbinding.

Vergelijking relatieve grondspanningen verticaal langs de dwarsverbinding (SM1 en SM4)
Verskil tussen DV1 (zand) en DV2 (Boomse klei)



klei

zand

Figuur 9.4 Vergelijking grondspanningen verticaal langs de dwarsverbinding

Tabel 9.1 Samenvatting observaties DV1 en DV2

observaties AGF	DV1	DV2
<i>grondsoort</i>	ZAND	KLEI
vorstgevoeligheid diepte van hart van DV	verwaarloosbaar 18 m-mv	matig - sterk 29 m-mv
aanvang bevroering tot openen deur duur afbouw DV	~ 5 weken 3 mnd	~ 6 weken 3 mnd
maximale toename vriesspanning	~ 50 kPa	~ 800 kPa
maximale verplaatsing tunnelsegmenten	1-3 mm	(>) 18 mm
toename waterdruk in kern	> 2 bar	veranderende plasticiteit van klei in het hart van DV
deformatie grond horizontaal	4 mm	36 mm

9.2. ZAND

Deformatie

De deformatie van de grond en de tunnel die gemeten is bij DV1 is zeer laag tot niet significant. Deze resultaten zijn vergelijkbaar met de resultaten van de gedraineerde cryogene testen bij -15 en -30 °C waar verplaatsingen in de axiale en radiale richting lager zijn dan resp. 0,06 en 0,15 %. Zowel de resultaten van de laboratoriumtesten als de veldmetingen liggen in de ordegrrootte van de vastgestelde meetfout.

Waterdruk

De waterdruk in het gesloten hart van de dwarsverbinding nam in het veld bij DV1 na sluiting van het bevroren lichaam zeer snel toe. De waterdrukstijging bij de Westerscheldetunnel duidt op een zelfde proces van waterdrukverhoging als gevolg van grondbevroering van zand als bij de ongedraineerde laboratoriumtesten (TNO-NITG, 2000). Bij ongedraineerde condities worden in zowel het laboratorium als in de praktijk grote uitzettingen gemeten. Omdat de waterdruk met een veiligheidsventielklep verschillende keren verlaagd is, kon geen grote deformatie van de hoofdtunnelsegmenten optreden bij DV1.

9.3. KLEI

Lineaire vorstheffing

In Fig. 9.6a is het lineaire vervormingsverloop te zien van de radiale (lees laterale) vervorming van bevroren klei in een laboratorium vriesexperiment van 600-800 kPa spanningsverhoging. In de Westerscheldetunnel praktijkproef is ook een lineair verband gemeten van de verplaatsing van tunnelsegmenten (fig. 9.6b). Op 28 augustus 2000 wordt de dwarsverbinding geopend, zodat het deformatiepatroon dan sterk terug loopt.

Uit de vergelijking met de experimentele resultaten (in het lab. zijn vriesdeformaties gemeten en géén vriesspanningen) kan geconcludeerd worden dat axiale deformatie in klei bij de dwarsverbinding lineair blijft toenemen bij doorgaande grondbevriezing. Omdat de deformatie van de westtunnelbuis verschilt van de oostbuis mag worden aangenomen dat in de westbuis een radiale component van vorstuitzetting aanwezig is (doordat de temperatuurgradiënt loodrecht op de tunnelbuis geïntendeerd is). Daarom mag de vergelijking worden gemaakt tussen de laterale deformatie van het vriesexperiment met de deformatie van de westbuis (zie fig. 9.5).

Pas wanneer de ontgraving start wordt de deformatie van de tunnelsegmenten minder. De verplaatsing wordt veroorzaakt door vorstuitzetting van bevroren klei. In de overige dwarsverbindingen van de Westerscheldetunnel in de Klei van Boom zijn vergelijkbare verplaatsingen van de tunnelsegmenten gemeten.

Tunneldeformatie

In het laboratorium is maximaal 0,15 % *axiale* en maximaal 2,9 % *radiale* verplaatsing gemeten in proeven met een vrieslanstemperatuur van -30°C (TNO-NITG, 2000).

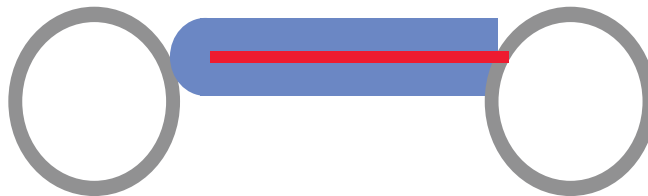
Omgerekend naar de afmeting van het bevroren grondmassief bij de Westerscheldetunnel kan de deformatie van het tunnelsegment benaderd worden door de volgende berekening:

$$\begin{aligned} 0,15\% \cdot 12000/2 &= 9 \text{ mm evenwijdig aan de oostzijde} \\ 0,15\% \cdot 12000/2 + 2,9\% \cdot 300 &= 18 \text{ mm aan de westzijde} \end{aligned}$$

waarbij (zie ook fig. 9.5):

- 12000 mm : is de lengte van 12 m van de vrieslansen
- 300 mm : is de afstand tussen de afgesloten vrieslansen en de geboorde tunnelbuis:

Aan de westzijde is de vorstheffing groter dan aan de oostzijde. Dit wordt veroorzaakt door de vrieslansen niet door de tunnelsegmenten van de westbuis zijn geboord, maar stoppen tegen de groutlaag rond de tunnelbuis. De effectieve werking van de vrieslansen ligt daardoor 300 mm van de tunnelbuis verwijderd. Het temperatuurveld loopt hierdoor niet meer ideaal evenwijdig aan de vrieslansen, waardoor een extra component van de vorstheffing kan ontstaan (fig. 9.5).



Figuur 9.5 Situatieschets van de asymmetrische vorm van de bevroren grondlichaam.

In het laboratorium is tevens maximaal 0,15 % radiale verplaatsing gemeten evenwijdig aan de gelaagdheid (TNO-NITG, 2000). In ongedraineerde situaties kan dat meer zijn. Deze maximale radiale verplaatsing in het experiment kan vergeleken worden met de resultaten van de deformatie van de hellingmeetbuizen. De hellingmeetbuizen bij DV2 geven een (radiale) deformatie aan beide zijden van de dwarsverbinding van maximaal 36 mm (36 mm aan beide zijden levert 72 mm uitzetting op 9 m diameter van het bevroren grondlichaam met 0,8 %).

De metingen van vriesspanningen met stress monitorings stations gaven in alle richtingen ongeveer even grote waarden van de spanningsverhogingen (isotroop gedrag).

In een 3D-vorstheffingstest wordt onderscheid gemaakt tussen axiale en radiale vorstuitzetting. Een 3D-vorstheffingstest wordt uitgevoerd onder triaxiale grond-spanningscondities en is daardoor beter geschikt voor toepassing ten behoeve van grondbevriezing bij tunnelbouw en ondergronds bouwen. In de 3D-test kan ook beter informatie worden verkregen over effecten van gedraineerde en niet-gedraineerde grondcondities.

Waterdruk

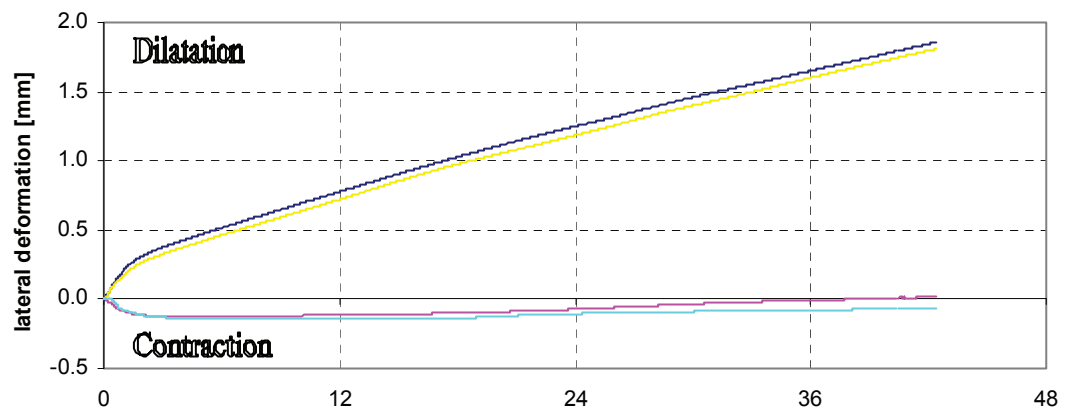
De waterdruk die in het laboratorium gemeten is kan voor klei niet goed vergeleken worden met de in-situ condities. Dit omdat de waterdruk in het laboratoriumexperiment gemeten is aan de buitenzijde van het onbevroren monster, terwijl de waterdruk in-situ is gemeten in de bevroren klei bij temperaturen onder 0 °C. Ten tweede is gebleken dat de in-situ metingen niet betrouwbaar geïnterpreteerd kunnen worden.

9.4. CONCLUSIES

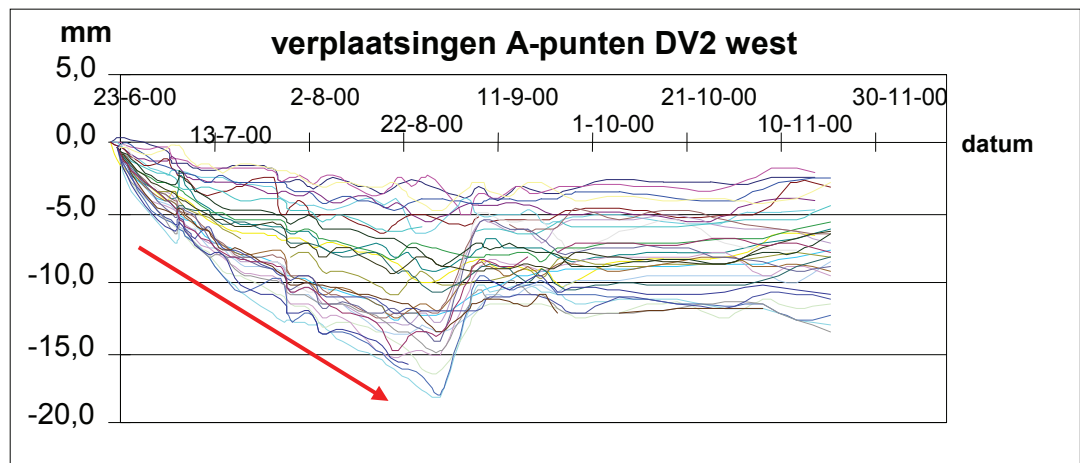
De resultaten van 3D-vorstheffingsproeven geven toepasbare informatie over de vorstgevoeligheid van een grondsoort, alsmede kwalitatieve informatie over vorstheffing bij praktijkprojecten.

Uit een een klassieke 1D-vorstheffingsproef kan de vorstgevoeligheid van grondsoorten onder uni-axiale spanningstoestand in het laboratorium gemeten worden (zie Hoofdstuk 4; Nixon & Morgenstern, 1980). De resultaten van deze test kunnen worden gebruikt voor de vaststelling van segregatiepotentiaal (SPo). Deze test wordt gebruikt voor het testen van grondsoorten aan het maaiveld uit gebieden met permafrost. Voor de tunnelbouw is de informatie die uit een 1D-vorst-heffingstest komt beperkt, omdat de richting uit de 1D testen overeenkomt met de vriesrichting loodrecht op de vrieslansen en niet evenwijdig eraan.

a Testresultaten (test nr. 25) van laterale (radiale) uitzetting in een 3D-vorstheffingproef (TNO-NITG, 2000).



b Praktijkmetingen van verplaatsing van tunnelsegmenten bij DV2-west



Figuur 9.6 Vergelijking van lineaire deformatie van de tunnelsegmenten bij DV2 en radiale verplaatsing in een 3D-vorstheffingsproef.

10. REKENREGELS

In dit hoofdstuk worden enige (bestaande) rekenregels toegepast op de grond- en monitoringgegevens van de Westerscheldetunnel. Rekenregels van de volgende aspecten worden toegepast:

- sterkte en stijfheid bevroren grond (par. 10.1)
- segregatiepotentiaal SP_o (par. 10.2)
- fractie onbevroren water (par. 10.3)
- vriesdrukken (par. 10.4)
- temperatuur van de grond (par. 10.5)

10.1. STERKTE EN STIJFHEID VAN BEVROREN GROND

Sterkte en stijfheid

In deze paragraaf worden gegevens uit de literatuur betreffende de sterkte en elasticiteit van bevroren klei en doorlatend zand behandeld. Voor meer algemene informatie over gepubliceerde gegevens van sterkte en elasticiteit van bevroren grond wordt verwezen naar het rapport TNO-NITG (2000).

In fig. 10.1 staat een samenvatting van de ‘unconfined compressive strength’ (UCS) die in de literatuur beschikbaar zijn. De sterkteontwikkeling van bevroren klei verschilt sterk van die van bevroren zand. Bij lagere temperaturen is zand sterker, terwijl bij temperaturen lager dan $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ juist klei sterker is.

Sterkte bevroren zand

Bij voortdurende verlaging van de temperatuur blijft de sterkte van bevroren grond niet toenemen. De sterkte-temperatuur curve van bevroren zand geeft een verminderde toename van de sterkte bij -50 tot $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bij ca. $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ is een sterk verhoogde ‘micro-seismiciteit’ waargenomen. Micro-seismiciteit duidt op microscopische vervorming van kristalroosters. De vervlakking van de curve van de compressieve sterkte bij verdere bevroening wordt vervolgens door Bourbonnais & Ladanyi (1985b) gerelateerd aan het ontstaan van micro-structurele breukvorming aan de korrelstructuur bij ca. $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (fig. 10.1).

Sterkte bevroren klei

Een groot aantal geomechanische testen is uitgevoerd met monsters van de Boomse klei (uit België) om het mechanische en rheologische gedrag gedurende kunstmatige bevroening te bepalen (Thimus et al., 1991). Uni-axiale, triaxiale compressie en extensie-testen zijn uitgevoerd bij $+20$, -2 , -5 , -10 , -20 en $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. De resultaten van de uni-axiale druksterkte proeven laten een verschuiving van het bezwijkpunt zien van $2,4\text{ MPa}$ bij $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ naar 10 MPa bij $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Bourbonnais & Ladanyi (1985a) hebben de uni-axiale sterkte van bevroren klei in het laboratorium getest bij verschillende deformatiesnelheden en rapporteren een toename van uni-axiale sterkte van 5 MPa bij $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ tot ca. 100 MPa bij $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$. De verschillen in testresultaten in Fig. 10.1 worden onder meer verklaard door de verschillen in temperaturomstandigheden en in opgelegde deformatiesnelheid.

Elasticiteit bevroren grond

De elasticiteitsmodulus E en Poisson's ratio ν zijn afhankelijk van de grondsoort, de temperatuur, het type (triaxiaal of uni-axiaal) en de uitvoering van de test (gedraineerd of ongedraineerd, geconsolideerd of ongeconsolideerd). Er worden verschillende waarden van bevroren grond in de literatuur gegeven, waarbij het niet altijd duidelijk is onder welke testcondities de meting is verricht.

Tsytoovich (1975) en Johnston (1981) geven een verband voor verschillende grondsoorten tussen de elasticiteitsmodulus E (MPa) en de vriestemperatuur T onder 0 °C (bij een grondspanning van 200 kPa):

- Voor bevroren fijn zand (korrelgrootte tussen 50 en 250 μm , $w = 17\text{-}19\%$, temperatuur van 0 tot $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$):
 - $E = 500 (1 + 4,2 \cdot |T|)$
- Voor bevroren silt (korrelgrootte tussen 5 en 50 μm , $w = 26\text{-}29\%$, temperatuur van 0 tot $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$):
 - $E = 400 (1 + 3,5 \cdot |T|)$
- Voor bevroren klei (50 % van korrels kleiner dan 5 μm , $w = 46\text{-}56\%$, temperatuur van 0 tot $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$):
 - $E = 500 (1 + 0,46 \cdot |T|)$

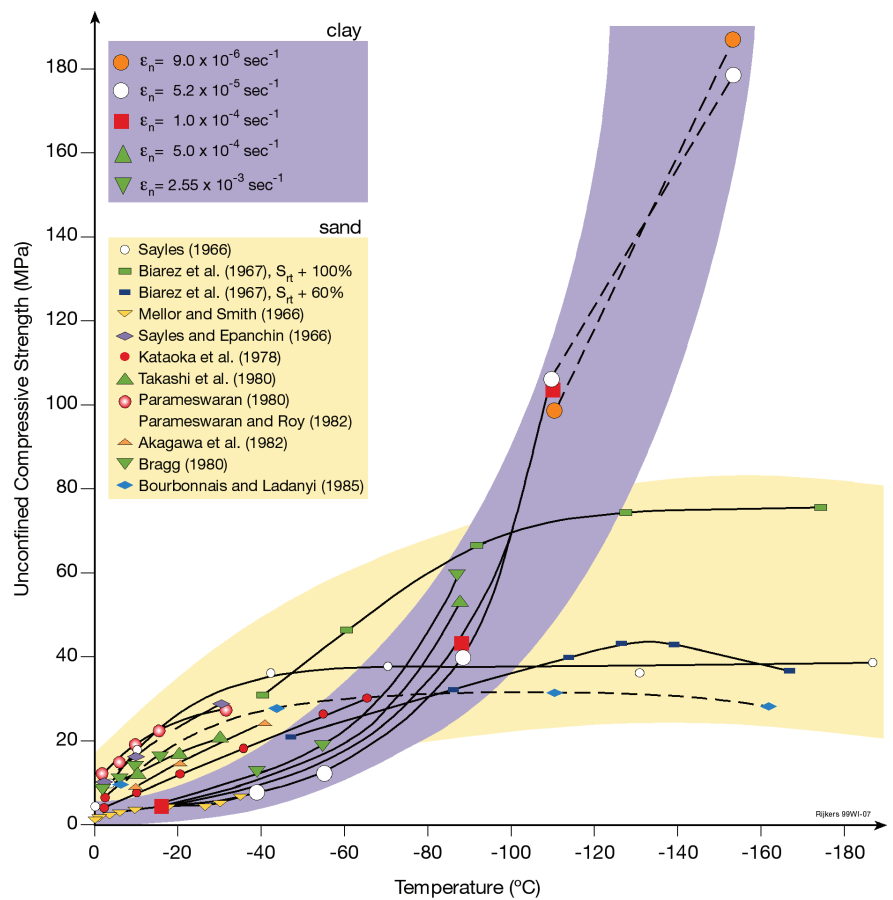
In tabel 10.1 staan (bij een isotrope en homogene temperatuur) elasticiteitsmoduli van verschillende grondsoorten bij -5 en $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ die zijn uitgerekend op basis van bovenstaande formules. Deze waarden zijn globale schattingen zodat resultaten van cryogene sterktetesten kunnen verschillen. Merk op dat de elasticiteitsmodulus van beton ca. 30.000 MPa bedraagt.

Na vergelijking van berekende waarden van elasticiteitsmoduli met waarden van Jessberger van Tabel 4.2 en 4.3 blijkt dat de E -moduli in tabel 10.1 hoger zijn. Dit kan verklaard worden door de lagere steundruk die bij de experimentele bepalingen van Jessberger gebruikt zijn. Het is daarom van belang rekening te houden met een optredende steundruk in de grond als een grondbevroeringsproject wordt uitgevoerd.

De elasticiteitsmodulus van bevroren klei (Klei van Boom) bij $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ bedraagt 465 MPa volgens Ladanyi (1982). De elasticiteit in onbevroren toestand bedraagt dan 100 MPa (Ladanyi, 1982). Sego et al. (1982) toonden aan dat de sterkte van de bevroren grond afhankelijk is van de deformatiesnelheid. Zhu & Carbee (1984) toonden met een logaritmisch verband aan dat bij lagere deformatiesnelheden bevroren grond een hogere sterkte heeft.

Tabel 10.1 Berekende elasticiteitsmodulus bij verschillende grondsoorten op basis van Johnston (1981).

	elasticiteitsmodulus E (MPa) bij -5 °C	elasticiteitsmodulus E (MPa) bij -10 °C
zand (50 - 250 μm , $w = 17\text{-}19\%$)	11000	21500
silt (5 - 50 μm , $w = 26\text{-}29\%$)	7400	n.v.t.
klei ($< 5\ \mu\text{m}$, $w = 46\text{-}56\%$)	1650	n.v.t.



Figuur 10.1 De sterkte van zanden en kleien als gevolg van grondbevriezing (aangepast naar Bourbonnais & Ladanyi, 1985a,b).

10.2. RELATIE SEGREGATIEPOTENTIAAL EN TEMPERATUURGRADIËNT

Bij ééndimensionale grondbevriezing wordt een verband gevonden de vorstheffing h en de temperatuurgradiënt $grad\ T$. De uitzetting van grond gedurende bevriezing vindt plaats in de richting loodrecht op het vriesfront:

$$SP = \frac{h}{gradT}$$

waarin:

SP = segregatiepotentiaal bij de ijslens [m²/ (°C. s)]

h = snelheid van het vorstfront [m/s]

grad T = temperatuurgradiënt [°C/m]

en:

$$SP(p) = SP_0 \cdot e^{-a \cdot \sigma_n}$$

waarin:

SP (p) = segregatiepotentiaal onder belasting □ n

SPo = segregatiepotentiaal zonder extra belasting

σn = gedefinieerd als spanning loodrecht op het vorstfront

a = grondfactor (Konrad & Morgenstern, 1984)

Met behulp van de in paragraaf 4.1 vastgestelde grondfactor *a* en experimentele gegevens van cryogene testen met monsters van BK1 en BK2 kan de segregatiepotentiaal nu worden berekend. De rekenwijze en resultaten staan weergegeven in tabel 10.2.

In fig. 10.2 staat het (lineaire) verband tussen de vorstheffing *h* en de temperatuurgradiënt *grad T* dat gemeten is gedurende laboratoriumtesten met monsters uit de eenheden BK1 en BK2 (Jessberger, 1998). Hoe hoger de temperatuurgradiënt *grad T* hoe hoger de vorstheffingssnelheid *h*.

De vorstgevoeligheid van BK1 en BK2 wordt volgens de systematiek van ISSMFE (1989) ingeschat op 'verwaarloosbaar tot laag'. Op basis van de 1D-vorstheffingstesten van Jessberger (1989).

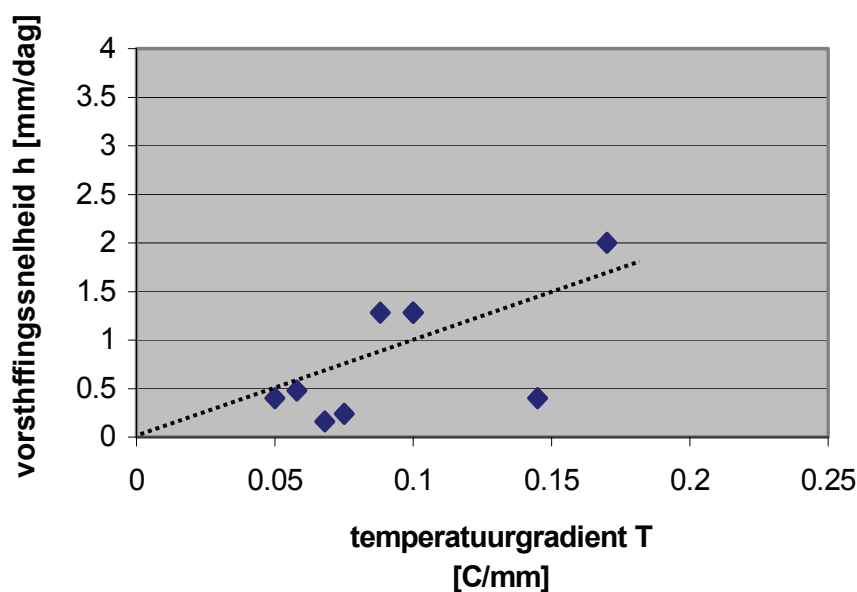
Het is opmerkelijk dat de classificatie van BK1 en BK2 op basis van type grondsoort en plasticiteitwaarde (niet-organische siltige klei met lage plasticiteit en $W_1 = 25-30\%$) een hogere vorstgevoeligheid geeft, nl. 'matig tot sterk' (zie tabel 2.2 en 3.11).

Het is aan te bevelen om voor onbekende grondsoorten die bevroren zullen worden in een praktijkuitvoering aparte vorstheffingsproeven uit te voeren volgens de laboratoriumvoorschriften (Sayles et al, 1989).

Tabel 10.2 Resultaten van berekeningen van SPo en vorstgevoeligheid op basis van segregatiepotentiaal.

	diepte <i>m-NAP</i>	snelheid van vorstheffing <i>h</i> <i>mm / dag</i>	temperatuur- gradient grad T $^{\circ}\text{C} / \text{mm}$	segregatiepotentiaal onder belasting SP(p) $\text{mm}^2 / (^{\circ}\text{C} \cdot \text{uur})$	segregatiepotentiaal zonder belasting SPo $\text{mm}^2 / (^{\circ}\text{C} \cdot \text{uur})$	vorstgevoeligheid volgens (ISSMFE, 1989)
BK1	42.2	0.4	0.145	0.11	0.12	verwaarloosbaar
BK1	46.1	1.28	0.1	0.53	0.56	laag
BK1	42.2	1.28	0.1	0.53	0.56	laag
BK2	31.6	0.48	0.058	0.34	0.39	verwaarloosbaar
BK2	46.5	1.28	0.088	0.61	0.69	laag
BK2	41.9	2	0.17	0.49	0.56	laag
BK2	36.2	0.4	0.05	0.33	0.38	verwaarloosbaar
BK2	41.4	0.16	0.068	0.10	0.11	verwaarloosbaar
BK2	45.3	0.24	0.075	0.13	0.15	verwaarloosbaar

vorstheffing van BK1 en BK2



Figuur 10.2 De relatie tussen de temperatuurgradiënt T en de vorstheffingssnelheid h van vriesproeven met grondmonsters uit BK1 en BK2.

10.3. FRACTIE ONBEVROREN WATER

De fractie onbevroren water W_u is afhankelijk van de temperatuur T en de grondsoort. De hoeveelheid water die wordt uitgedreven hangt af van de permeabiliteit van de grond, de heersende waterspanning en de volumeverandering van de grond door bevriezing. Het onbevroren watergehalte kan berekend worden volgens de formule van Anderson & Tice (1972):

$$w_u = \alpha \cdot \frac{|\Delta T|^\beta}{100} \quad (T < 0^\circ\text{C})$$

waarin:

ΔT = temperatuurdaling onder nul (uitgedrukt als positief getal in $^\circ\text{C}$)

α, β = karakteristiek van specifieke grondsoort gerelateerd aan specifieke oppervlakte

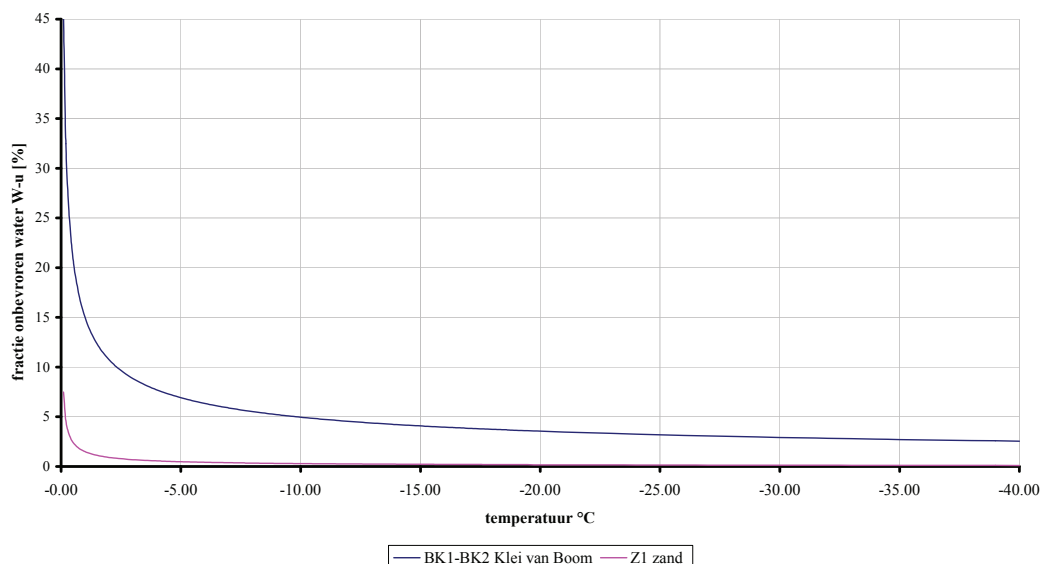
Tice et al. (1976) heeft een eenvoudige methode ontwikkeld om α en β te berekenen op basis van de vloeigrens W_l . Voor uitwerking en gebruik van deze methodiek wordt verwezen naar de literatuur.

In tabel 10.3 staan de berekende waarden van α en β voor siltig zand en klei van Boom (TNO-NITG, 2000). Met deze waarden en de bovenstaande formule zijn voor het zand van de eenheid Z1 en de klei van de eenheden BK1-BK2 de onbevoren watergehalten W_u uitgerekend als functie van de temperatuur. Zand heeft een lager percentage onbevoren water ten opzichte van klei (fig. 10.3).

Tabel 10.3 α en β waarden, gebruikt voor het HSL-Zuid onderzoek (TNO-NITG, 2000).

grondsoort	α	β
zand	5,037	-0,591
watergehalte $w = 19,6 \pm 1,6$ %		
klei	8,977	-0,400
watergehalte = $25\% \pm 2,6$ %		
vloeigrens $W_l \sim 50-60$ %		

Fractie onbevoren water vs temperatuur



Figuur 10.3 Fractie onbevoren water W_u van de klei van Boom BK1 en BK2 en het zand Z1 als functie van de temperatuur

10.4. VRIESDRUKKEN EN PERMEABILITEIT

Het is duidelijk dat vorstheffing sterk afhankelijk is van de grondsoort (Konrad & Morgenstern, 1984; Penner, 1963, Konrad, 2000). Een van de bepalende eigenschappen van grond is de waterdoorlatendheid k . Omdat door bevriezing poriënwater gaat migreren (door een ‘cryo-zuigingspotentiaal’) is de waterdoorlatendheid een zeer geschikte parameter om in relatie met vorstuitzetting te bestuderen.

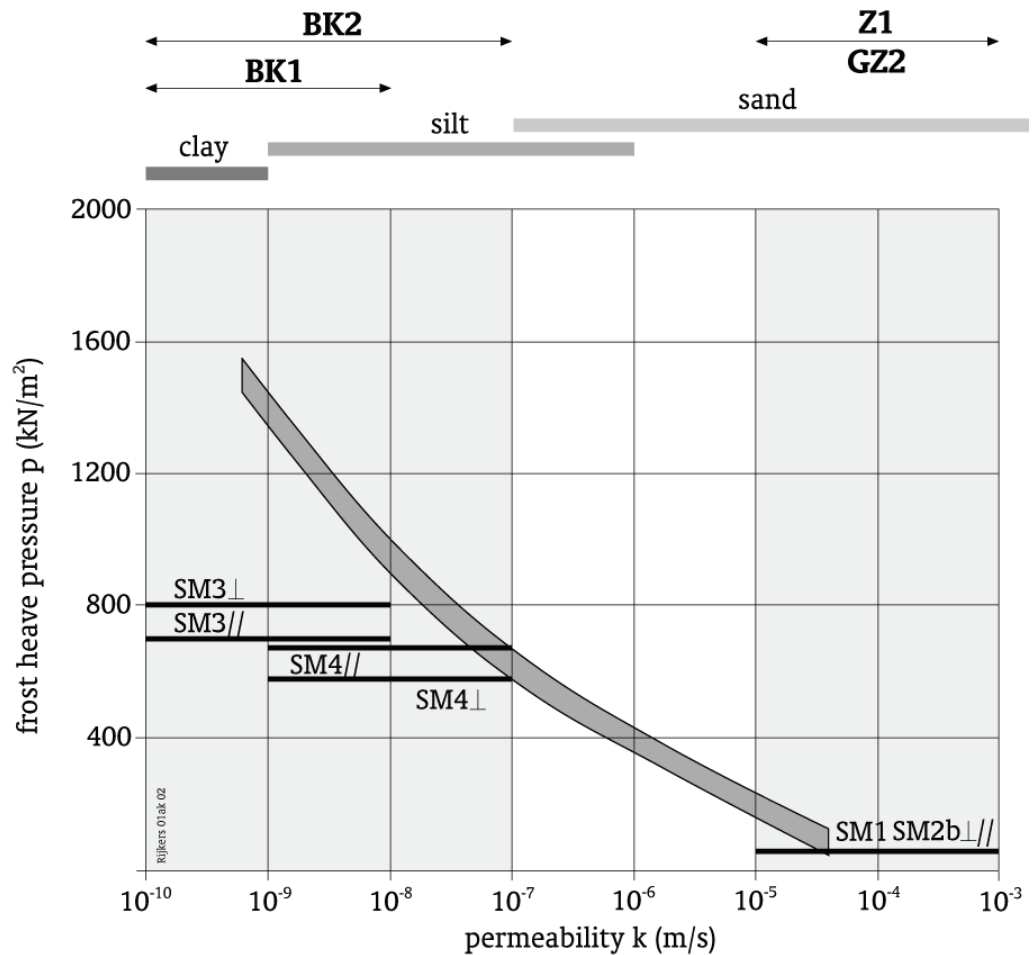
Kafoed & Doran (1996) hebben een praktische relatie gevonden tussen permeabiliteit en vorstheffing (zie fig. 2.1). Wanneer de waterdoorlatendheden van Z1 en BK1-BK2 de verwachte vorstheffing gezocht wordt, blijkt dat:

1. bij DV1 (zand) vriesdrukken tot 200 kPa verwacht mogen worden, en
2. bij DV2 (klei) vriesdrukken van 600 tot 1600 kPa verwacht mogen worden.

In Fig. 10.4 zijn de vorstspanningen geplot versus de doorlatendheid (m/s). Deze waarden zijn relatieve spanningen die gemeten zijn bij DV1 en DV2. De absolute waarden van grondspanningen zijn een stuk hoger (tot ca. 1200 kPa: zie *Bijlage L*).

Bij DV1 (zand) bedraagt de toename van de vriesdruk maximaal 80 Pa. Bij DV2 bedragen de toename van de vriesspanning maximaal 800 kPa. Voor beide dwarsverbindingen komen de gemeten waarden dan overeen met de verwachte waarden (zie fig. 10.4).

Hierbij wordt opgemerkt dat er bij de verwachting van Kafoed & Doran (1996) geen rekening wordt gehouden met de richting waarin de spanning werkbaar is. Bij de dwarsverbindingen van DV1 en DV2 is daarin wel een verschil geobserveerd.



Figuur 10.4 De relatie vriesdruk en permeabiliteit (aangepast naar Kofoed & Doran, 1996 en Hölting, 1989)

10.5. THERMALE STROMINGSBEREKENINGEN

10.5.1. INLEIDING

Voor dit project zijn 2D thermische berekeningen gemaakt. Enerzijds om de gemeten temperaturen ter plaatse van de opnemers te vergelijken en een indruk te krijgen van de ontwikkeling van het vorstfront; anderzijds om inzicht te krijgen in de invloed van thermische parameters van grond. Door thermale stromings-berekeningen uit te voeren is men in staat een redelijke voorspelling te doen over de temperatuur die op een bepaalde locatie en een tijdstip bereikt wordt.

De volgende berekeningen zijn uitgevoerd:

1. variant 1: temperatuur vrieslansen direct op -37°C
2. variant 2: temperatuur vrieslansen conform de gemeten temperaturen van de vrieslansen.
3. variant 3: temperatuurberekening met DIANA (ter vergelijking met variant 1 en variant 2)

Variant 1 en 2 zijn berekend met een eenvoudig analytisch model, Variant 3 is berekend met behulp van het eindige-elementenprogramma DIANA. Deze berekening is uitgevoerd door N.M. Naaktgeboren (Rijkswaterstaat). Alle berekeningen zijn gedaan voor DV1 (zand Z1). Variant 1 en 2 verschillen van elkaar in de manier waarmee de temperatuur van de vrieslansen is opgelegd.

De eerste variant is uitgevoerd door de temperatuur ter plaatse van de vrieslansen te fixeren op -37°C . Dit scenario is gekozen om de effecten te zien tussen directe en geleidelijke bevroering. Zo is de invloed van de vriesinstallatie belangrijk omdat de temperatuur in eerste instantie niet direct -37°C is, maar geleidelijk daalt van circa 11,5 graden tot gemiddeld -37°C . Bij variant 2 en variant 3 neemt de temperatuur van de vrieslansen geleidelijk af conform de gemeten temperaturen van de vrieslansen.

10.5.2. ANALYTISCH MODEL

De algemene vergelijking voor 2D thermische diffusie luidt:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{C} \nabla^2 T(x, y)$$

met

$$\nabla^2 T(x, y) = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2},$$

waarin:

λ = thermische conductiviteit

C = warmte-capaciteit.

In de 2D berekeningen wordt een gelijkmatig verdeeld oppervlak van 25x25 m gebruikt met $\partial x = \partial y$. De formule voor de temperatuur op tijdstip t in punt (ix, iy) ziet het er als volgt uit:

$$T_2(ix, iy) = T_1(ix, iy) + \frac{\lambda}{C} \cdot \nabla^2 T_1(ix, iy) \cdot \partial t$$

met

$$\begin{aligned} \nabla^2 T_1(ix, iy) = & \frac{T_1(ix-1, iy) - T_1(ix, iy)}{\partial x^2} + \frac{T_1(ix+1, iy) - T_1(ix, iy)}{\partial x^2} + \\ & + \frac{T_1(ix, iy-1) - T_1(ix, iy)}{\partial y^2} + \frac{T_1(ix, iy+1) - T_1(ix, iy)}{\partial y^2} \end{aligned}$$

In dit geval is $\partial x = \partial y$ dus kan vereenvoudigd worden tot bijvoorbeeld:

$$\nabla^2 T_1(ix, iy) = \frac{T_1(ix-1, iy) + T_1(ix+1, iy) + T_1(ix, iy-1) + T_1(ix, iy+1) - 4 \cdot T_1(ix, iy)}{\partial x^2}$$

$$\frac{\lambda}{C} = f(T, m), \text{ waarin } T \text{ de temperatuur is en } m \text{ de materiaalsoort}$$

MESH

De grootte van het mesh is 25 x 25 m met een gelijkmatige verdeling van 100 x 100 elementen. De keuze voor deze afmetingen is afhankelijk van de diameter van de vrieslansen. Met behulp van de kegelformule is na te gaan dat de invloed van een als 1 punt gemodelleerde vrieslans bij deze mesh-grootte ongeveer 10 cm is. Een verandering in de mesh-grootte brengt met zich mee dat de vrieslansen anders gemodelleerd moeten worden. Zo zal een verfijning van het mesh al snel tot een toename van de numerieke nauwkeurigheid leiden. Een nadeel van de hier gebruikte eindige verschillenmethode is dat de rekentijd enorm toeneemt naarmate men wil verfijnen.

Bij elke berekening zijn de temperaturen ter plaatse van de temperatuursensoren weggeschreven. Zo kunnen de berekende waarden vergeleken worden met de gemeten waarden. De dichtheid van het gebruikte mesh is maatgevend voor de nauwkeurigheid van de positie van opnemers en lansen. In dit geval is elk elementje 0,25 x 0,25 m groot.

RANDVOORWAARDEN

De initiële temperatuur over het hele gebied is op 11,5 °C gezet. De randen worden door de tijd op een vaste temperatuur van 11,5 °C gehouden.

EXTERNE EFFECTEN

Juist omdat de externe effecten op de temperatuur zo groot zijn is het niet mogelijk om een berekening over het hele vries-dooittraject te maken. Voor een redelijke vergelijking tussen theorie en praktijk is het echter wel mogelijk om het begintraject tot aan ontgraven te vergelijken. Alhoewel in dit traject ook al twee externe effecten een rol spelen, namelijk de ontwatering vanuit het hart van DV1 en de ontluchting van de bovenste vrieslansen. Deze laatste processen zijn niet meeberekend.

De invloed van de tunnelbuizen wordt groot verondersteld. Om die reden is gekozen voor vergelijking ter plaatse van VW1, SM1, T1B4 en T2B4. Deze opnemers liggen alle ongeveer in het midden tussen de tunnelbuizen. Bij VW1 heeft wel de ontluchting invloed op het temperatuurverloop. Dit herstelt zich echter na verloop van tijd.

THERMISCHE GEGEVENS

Voor de berekeningen zijn wij uitgegaan van gemeten waarden voor de thermische conductiviteit en warmte-capaciteit. Deze metingen zijn deels door GeoDelft en deels door Jessberger uitgevoerd. De latente warmte is meegenomen in de warmte capaciteit in het transitie-interval (latente warmte). Normaal gesproken zou de latente warmte conform de fractie onbevroren water over het gehele temperatuurverloop onder het vriespunt verdeeld moeten worden. In de berekeningen is dit getracht mee te nemen. De rekenresultaten voldeden niet aan de verwachting. De reden hiervoor is dat een groot gedeelte van de latente warmte direct geleverd moet worden zodra het water bevroert. Het gaat om een zeer gering temperatuurinterval waarover dit gebeurt. De numerieke benadering is hiervoor te grof, waardoor dit traject gemist wordt.

Doordat de temperatuursprongen per tijdsstap te groot zijn spring je als het ware over dit gebied van hoge latente warmte heen. Om deze reden is ervoor gekozen de latente warmte over een bepaald temperatuurinterval te verdelen. Voor zand is een temperatuurinterval van 4 °C gekozen en voor klei 20 °C. De fractie onbevroren water heeft over dit interval zijn maximale gradiënt gehad. In tabel 10.4 staan de voor de thermisch berekeningen gebruikte thermische parameters.

RESULTATEN VAN HET ANALYTISCH MODEL

Om variant 1 te testen zijn een aanzienlijk aantal berekeningen gemaakt. Daaruit blijkt dat de voortschrijding van de temperatuur zeer gevoelig is voor interne en externe effecten. Voornamelijk de warmte-capaciteiten, thermische conductiviteiten, latente warmte, mesh-grootte, diameter vrieslansen, numerieke methode en positie van de opnemers in het mesh zijn van grote invloed gebleken.

In de grafieken van Fig. 10.5 en 10.6 vertonen de berekende waarden geen evenwichtige temperatuurontwikkeling. Dit heeft enerzijds te maken met de fijnheid van het gekozen mesh. Anderzijds met de opgelegde latente warmte tussen 0 en $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Het is duidelijk te zien dat de latente warmte een verminderde temperatuurverlaging tot gevolg heeft (direct onder $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; fig. 10.5). Dit verschilt met de praktijksituatie. Ter plaatse van alle thermosensoren worden dit soort effecten namelijk nauwelijks gemeten. Wellicht is de invloed van de latente warmte minder hevig dan waarvoor gekozen is voor het betreffende temperatuurinterval. Naar beide effecten is gekeken door bijvoorbeeld de latente warmte te verlagen of over een korter interval te laten lopen. Dit bleek echter een zeer intensieve oefening te worden en begon meer op ‘curve-fitting’ te lijken dan op een gestructureerd onderzoek.

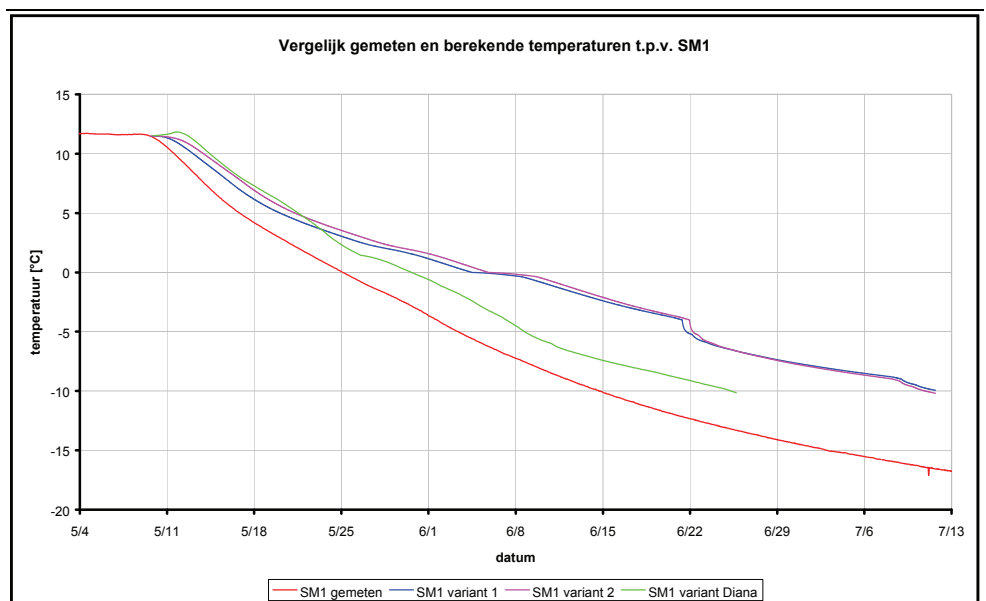
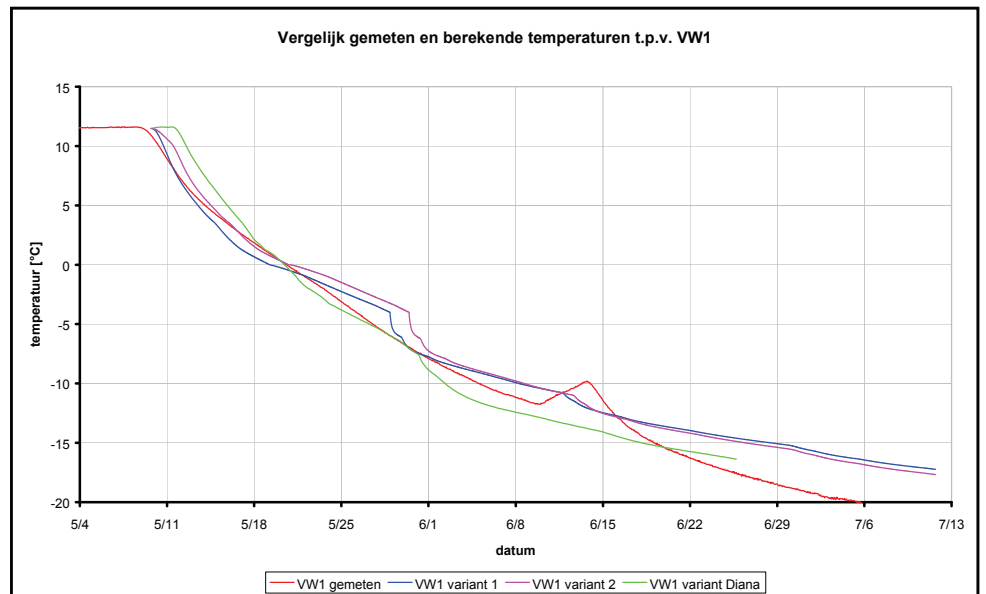
Variant 2 laat de vergelijking tussen de gemeten en de met variant 1 en 3 berekende waarden goed zien (Fig. 10.5 en 10.6). Over het algemeen kan geconcludeerd worden dat DIANA iets beter presteert. De oorzaak hiervan zal te maken hebben met de verschillende numerieke methoden. Tevens kunnen verschillen verklaard worden door de verfijning van het mesh rond de vrieslansen in rekenvariant 3 (DIANA).

VERGELIJKING VAN GEMETEN EN BEREKENDE TEMPERATUREN

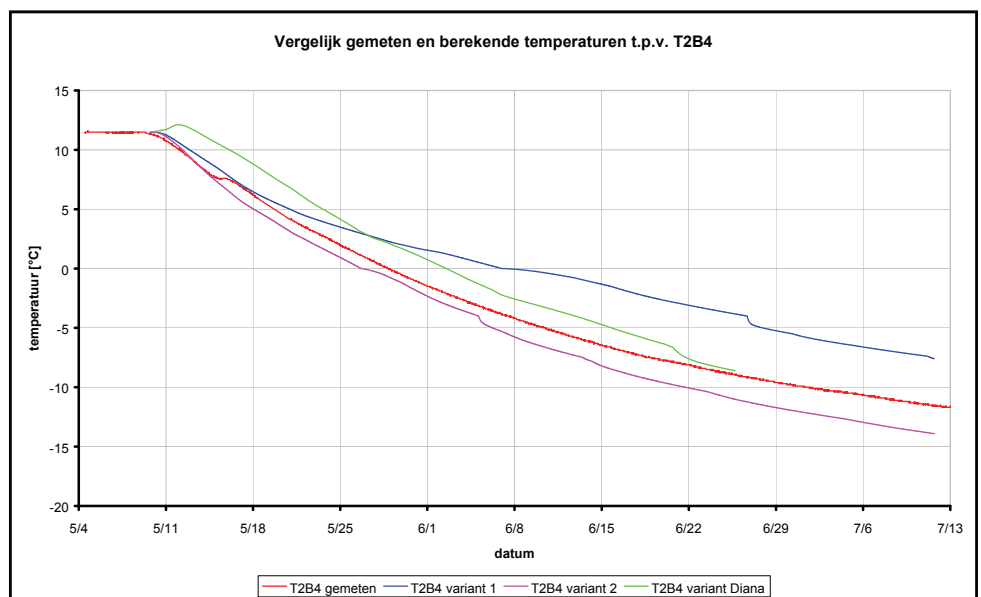
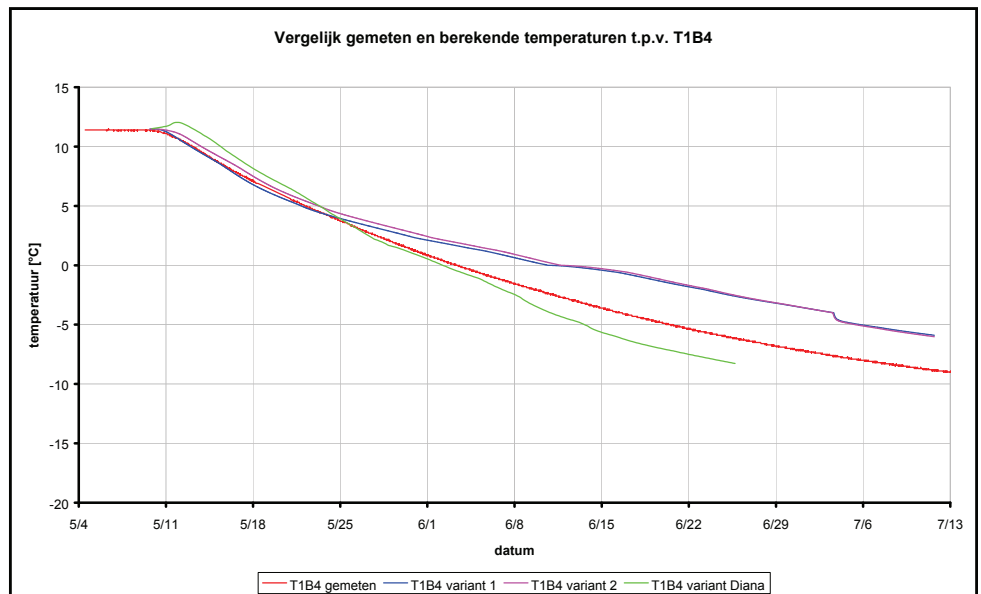
In de grafieken van fig. 10.5 staan de temperaturen bij VW1, SM1, TE1-4 en TE2-4 voor variant 1 tot en met 3 ten opzichte van de gemeten temperaturen bij deze instrumenten.

Tabel 10.4 Gemeten waarden voor dichtheid, watergehalte, λ , $C_{\text{onbevoren;vol}}$ en $C_{\text{bevoren;vol}}$. Berekende waarden voor $C_{\text{transitie;vol}}$

	eenheid	Z1
droge dichtheid	kg/m^3	1580
Watergehalte	%	25,6
massa water per m^3	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	404,48
λ	kgm/Ks^3	1,95
λ	kgm/Ks^3	3,44
$C_{\text{onbevoren;vol}}$	$\text{kJ}/\text{m}^3\text{ K } [\times 10^3]$	3,03
$C_{\text{transitie;vol}}$	$\text{kJ}/\text{m}^3\text{ K } [\times 10^3]$	13,6
$C_{\text{bevoren;vol}}$	$\text{kJ}/\text{m}^3\text{ K } [\times 10^3]$	2,18
$C_{\text{onbevoren;massa}}$	kJ/kgK	1,65
$C_{\text{transitie;massa}}$	kJ/kgK	74,12
$C_{\text{bevoren;massa}}$	kJ/kgK	1,19



Figuur 10.5 Vergelijking van gemeten en berekende temperatuurvarianten bij monitoringstations VW1 en SM1.



Figuur 10.6 Vergelijking van gemeten en berekende temperatuursontwikkeling met drie rekenvarianten bij temperatuursensoren T1B4 en T2B4.

10.5.3. CONCLUSIES TEMPERATUURBEREKENINGEN

Met thermale stromingsberekeningen kan men op redelijke wijze de temperatuur(ontwikkeling) voorspellen. Echter, een aantal rekenvarianten geeft temperatuurverschillen tussen de berekende en de gemeten temperatuur bij de monitoringstations van enkele graden tot meer dan 10 °C.

Voornamelijk de berekeningsvariant 2 – waarbij de werkelijke temperatuurontwikkeling van de vrieslansen gebruikt wordt als randvoorwaarde – geeft een goede vergelijking met de werkelijke temperaturen bij de monitoringstations.

De DIANA berekeningen vertonen optimale overeenkomst met de werkelijke temperatuur bij de monitoring stations. Het analytische model voldoet, maar DIANA berekeningen zijn nauwkeuriger.

Het wordt aanbevolen vervolgonderzoek uit te voeren naar de temperatuurontwikkeling van de grond. Ook heeft de parameterbepaling van warmtecapaciteit van de onbevroren en bevroren grond nader onderzoek en verbetering.

Echter, in relatie met onzekerheden in andere parameters wordt gesteld dat andere grondparameters voor bevriezing beter bekend moeten zijn alvorens nader onderzoek te doen naar de parameters voor temperatuurontwikkeling.

11. AANBEVELINGEN VOOR ONTWERP EN UITVOERING

In dit hoofdstuk worden aanbevelingen gedaan voor het ontwerp en de uitvoering van kunstmatige grondbevriezing van slappe grond. De aanbevelingen zijn als volgt onderverdeeld:

Parameterbepaling en vorstheffing:

- Geologisch, geomechanisch en geohydrologisch onderzoek (par. 11.2)
- Laboratorium onderzoek (par. 11.3)

Uitvoering:

- Controle van de temperatuur van grond en tunnel (par. 11.4)
- Controle van vervorming van tunnel en de omgeving (par. 11.5)

Voor meer informatie over ontwerp wordt verwezen naar Harris (1995) en naar (Mesman, CUR-COB M530, 1999).

11.1. GEOLOGISCH, GEOMECHANISCH EN GEOHYDROLOGISCH ONDERZOEK AGF

Het verschil in geomechanisch gedrag tussen DV1 en DV2 is groot. De verschillen worden grotendeels verklaard door de verschillende grondsoorten die bevroren worden.

De vriesspanningen, de deformatie van het grondmassief en de deformatie van de tunnelbuizen bij bevriezing van de klei (Laagpakket van Boom) bij DV2 zijn significant hoger dan in het bevroren zand (Laag van Ruisbroek) bij DV1. Om de deformatie van de tunnel te controleren is het belangrijk de volgende natuurlijke eigenschappen van de grond te kennen:

1. lithologie (veen, klei, silt, zand, gelaagdheid),
2. korrelgrootte-verdeling (klei-, silt- en zandgehalte),
3. natuurlijk watergehalte,
4. ruimtelijke heterogeniteit en statistische betrouwbaarheid van grondparameters
5. grondwaterstroming, doorlatendheid en zoutgehalte

AANBEVELINGEN:

- a) Boringen en sonderingen worden in onmiddellijke nabijheid van de locatie van de grondbevriezing geplaatst. Het aantal *boringen* en *sonderingen* wordt hierbij afhankelijk gesteld van de heterogeniteit van de grond en geomechanische eigenschappen. De omvang van het grondonderzoek is ook afhankelijk van de sterkte (de vervormingcapaciteit zonder te bezwijken) van de geplande ondergrondse constructie.
- b) In een vroege fase van onderzoek en planning worden een geoloog en een ingenieursgeoloog betrokken bij het ontwerp van het bevroren grondlichaam. Deze definiëren de ruimtelijke variabiliteit en het laboratorium *grondonderzoek* ten behoeve van de kunstmatige grondbevriezing.
- c) De boringen dienen voor bestudering van de geologie en het nemen van (geomechanisch) *ongestoorde grondmonsters* t.b.v. het laboratorium-onderzoek. Extra sonderingen worden aanbevolen om de ruimtelijke heterogeniteit van grondlagen te bestuderen.
- d) Specifieke aandacht dient zicht te richten op lokale *grondwaterstroming* en natuurlijk zoutgehalte. Deze twee aspecten hebben invloed op de temperatuurontwikkeling en de sluiting (de waterdichtheid) van het bevroren grondlichaam.
- e) De vorstgevoeligheid wordt bepaald met 3D-vorstheffingsproeven op grondmonsters. Om optimale resultaten te behalen worden deze grondmonsters getest onder natuurlijke spanning, geohydrologische en geochemische (zoutgehalte) omstandigheden. Een gedetailleerd geologisch profiel wordt gebruikt om de geologische en ruimtelijke variatie te analyseren.

11.2. LABORATORIUMONDERZOEK CRYOGENE EIGENSCHAPPEN

De sterkte- en elasticiteitsparameters van bevroren grond dienen te worden meegenomen bij het constructief ontwerp van het ijslichaam en de aangrenzende ondergrondse constructies. De vorstuitzetting is noodzakelijk voor het sterkte-ontwerp van tunnelsegmenten of een ondergrondse constructie in de omgeving die kan worden beïnvloed. Deze ontwerpparameters zijn in het laboratorium te bepalen. Voor sommige constructies zijn ook kruipprocessen van belang. Ook het kruipgedrag kan in een speciaal laboratorium met cryogene apparatuur worden bepaald.

Aanbevelingen:

- a) Voor de specifieke waarden van *sterkte/elasticiteit* van een grondsoort wordt aangeraden laboratoriumonderzoek uit te voeren. De (laboratorium-) testcondities (i.e. temperatuur en grondspanning) dienen afgestemd te worden op de geplande vriestemperatuur en de in-situ grondspanning en uitvoering. Het blijkt dat de waarden bij verschillende in-situ grondspanningen sterk uiteen kunnen lopen.

- b) Ten behoeve van een stabiel en veilig ontwerp van toepassing van AGF wordt aanbevolen *cryogene laboratoriumtesten* uit te voeren op grondsoorten die bevroren zijn: (1) triaxiaal sterkte/stijfheid, (2) 3D-vorstuitzetting en (3) eventueel kruip. 3D-vorstheffingstesten worden sterk aanbevolen wanneer lange vriestijden gepland zijn in de uitvoering (> 1 maand). Wanneer de dragende werking van de bevroren grond langer is dan 1 maand worden tevens kruipproeven aanbevolen.
- c) Het spreekt voor zich dat voor deze cryogene testen ongestoorde monsters gebruikt dienen te worden. Direct na monsternamen in het veld dienen deze afgesloten in een klimaat gecontroleerde ruimte opgeslagen te worden.

11.3. CONTROLE VAN TEMPERATUUR EN WATERDICHTHEID

De controle van de temperatuur tijdens de grondbevriezing van de grond en (de aansluiting met) de constructies zijn essentieel voor het slagen van een vriesproject. Daarom dient bij het ontwerp rekening gehouden te worden met de plaatsing van thermokoppels in de grond en in de constructies.

Aanbevelingen:

- a) In het ontwerp dient een overwogen beslissing genomen te worden over de *locatie* en de afstand tussen de thermokoppels die in de temperatuurlansen geplaatst worden.
- b) De thermokoppels worden minimaal geplaatst bij te verwachten *warmtelekken* (bv. tegen de hoofdtunnels en tussen de vrieslansen).
- c) Temperatuurcontrole wordt in het optimale geval per vrieslans uitgevoerd. Door de temperatuur en het debiet te registreren kunnen *verstoppingen* en *lekken* in de vrieslans tijdig gedetecteerd worden en kan tevens het afgegeven vermogen per vrieslans worden bepaald.
- d) De vriesmachine dient uiteraard voldoende lage temperatuur te produceren om de grond voldoende te bevriezen. Dit dient afgestemd te worden met het ontwerp van het vrieslichaam. Grondbevriezing bij lage temperaturen levert naar verwachting minder vorstuitzetting op.
- e) Alhoewel de relatie tussen vriestemperatuur/vriessnelheid en vorstuitzetting niet bestudeerd is, kan worden aangenomen dat bij grote temperatuurgradiënten (bv. door gebruik te maken van stikstof tot $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$) de deformatie van de tunnelwanden minder zal zijn. De temperatuurgradiënt is weliswaar groter maar als gevolg van de snelle bevriezing zal het water nauwelijks de kans krijgen zich te verplaatsen om ijslenzen te vormen.
- f) Het wordt aanbevolen bij dwarsverbindingen de vrieslansen door een tunnelwand te plaatsen en door te boren tot in de groutlaag van de andere hoofdtunnel. Dit om de minimale temperatuurgradiënt loodrecht op (aanwezige) ondergrondse constructies aan te leggen. Zowel uit de laboratoriumtesten als uit het Froo-praktijkonderzoek blijkt dat op deze wijze de vriesdruk beperkt blijft.

- g) Bij het plaatsen van de vrieslansen wordt aangeraden de *opgeboorde grondsoorten* te beschrijven en te registreren. Deze informatie kan worden gebruikt om het lokale grondlagenmodel te optimaliseren. Deze is direct van belang voor bepaling van vorstuitzetting en temperatuurontwikkeling.
- h) Om een waterdichte ijsaansluiting tegen de constructies te verkrijgen wordt aanbevolen actieve (droogijs) en passieve *isolatie* toe te passen op de plaatsen waar de warmtelekken verwacht worden.
- i) De *waterdichtheid* van een bevroren grondmassief is zeer belangrijk voor de veiligheid in de tunnel. Door gegevens van de drukverhoging (via drukventiel) te combineren met de temperatuurgegevens van de grond en tunnelsegmenten is het mogelijk de waterdichtheid van het cilindrische bevroren grondlichaam te analyseren. Het risico van lekkages is groot direct langs de relatief warme hoofdtunnelbuizen en in zout water aquifers. Het spreekt voor zich dat de controlemethode via het veiligheidsventiel in slecht waterdoorlatende klei niet werkt. De waterdichtheid van het ijslichaam is wel te detecteren, maar correctie is niet mogelijk of eenvoudig. Ondanks genoemde aanbevelingen is het mogelijk dat door segregatie van zoutwater enkele zeer zoute gebieden ontstaan die niet bevroren blijken te zijn.

11.4. CONTROLE VAN VRIESSPANNING EN DEFORMATIE

Het is duidelijk dat de vriesspanning afhankelijk is van de grondsoort, de drainage en de vriestemperatuur. Over de drie-dimensionale uitzetting van bevroren grondsoorten is zowel theoretische, experimentele als praktijkkennis ontwikkeld van een aantal grondsoorten die aanwezig zijn bij dwarsverbinding DV1 (los zand) en bij dwarsverbinding DV2 (Klei van Boom). Over de 3D-uitzetting van silten (leem), gemengde grondsoorten, slappe klei en veen zijn relatief nog weinig gegevens beschikbaar. Met behulp van experimentele gegevens kan vooraf een inschatting worden gemaakt van de deformatie tijdens grondbevriezing.

Aanbevelingen:

- a) Om de ondergrondse constructies goed aan te kunnen leggen wordt sterk aanbevolen de *vervormingen* te registreren. De absolute vervorming van de aanwezige constructies (en eventueel de verandering van maatvoering van de hoofdtunnel). De relatie tussen vorstspanning en permeabiliteit (fig. 10.4) kan dan nuttig zijn bij een globale beschouwing van te verwachten vriesspanningen.
- b) Deformatie bij de aanleg van dwarsverbindingen kan gedeeltelijk verminderd worden, wanneer gedurende de grondbevriezing door middel van een *drainage-ventiel*, de waterdruk en de gronddruk verlaagd worden (in het onbevroren hart van de dwarsverbinding). Met een continue drukregelaar wordt de waterdruk geregistreerd. Bij doorlatend zand werkt de methode beter. Wanneer in klei de doorlatendheid slecht is zijn de mogelijkheden om deformatie tegen te gaan vrijwel nihil.
- c) In vorstgevoelige grondsoorten wordt sterk ontraden een onnodig langdurende vriestijd te gebruiken, omdat de bevriezing een deformatie vertoont die lineair met de tijd verloopt.

- d) De enige mogelijkheid om de doorgaande deformatie van tunnelbuizen te stoppen is om de ontgraving te starten. De uiteindelijke deformatie van de hoofdtunnelbuis wordt in klei dan ongeveer tot de helft gereduceerd.
- e) In het ontwerp van de hoofdtunnels dient rekening gehouden te worden met een extra *tolerantie* van de minimale maatvoering (van de tunneldiameter) die gecreëerd dient te worden voor de blijvende vervorming als gevolg van de grondbevriezing.
- f) Het wordt sterk aanbevolen de *deformatie en verplaatsing* van de aangrenzende (ondergrondse) constructies te monitoren. Wanneer noodzakelijk wordt aanbevolen ook de deformatie van de omgeving (bv. het maaiveld) te registreren.

11.5. UITVOERINGSPROBLEMEN EN MAATREGELEN

Op basis van de ervaringen bij DV1 en DV2 bij de Westerscheldetunnel zijn maatregelen geformuleerd om de geïdentificeerde risico's te minimaliseren. Deze zijn in tabel 11.2 gegeven.

Tabel 11.1 Risico's en aanbevolen maatregelen bij AGF

	risico / gebeurtenis	oorzaak	aanbevolen maatregelen
1	- tunneldeformatie en convergentie:,incl. voeg-verplaatsing en scheuren in tunnelsegment.	- <i>dilatantie</i> bevroren grond (volume expansie) - <i>ijslensvorming</i> - <i>verhoging waterdruk</i> in onbevroren kern	- door de isothermen optimaal evenwijdig aan de vrieslansen aan te leggen wordt de vriesdruk van de bevroren grond (<i>dilatantie</i>) verminderd. - <i>ijslensvorming</i> wordt verminderd door lage vriestemperaturen. Een continue relatief lage vriestemperatuur (~ een grote temperatuur gradiënt) zal ijslensvorming en ontstaan van vriesdruk verminderen. - de <i>waterdruk</i> in de (deels onbevroren) kern van het ijslichaam wordt verminderd door drainagebuizen aan te brengen.
2	- het deursegment (in de dwarsverbinding) kan niet geopend worden omdat ijslichaam niet-waterdicht is.	- te hoge temperaturen - door <i>warmte-aanvoer</i> vanuit de hoofdtunnels (aanhechting) - zout water - grondwaterstroming	- de waterdichtheid van een bevroren ijslichaam is een functie van de vriescapaciteit van de vriesmachine en de <i>warmte-aanvoer</i> vanuit de hoofdtunnels. De warmte-aanvoer vanuit de tunnels kan sterk verminderd worden door toepassing van passieve en actieve isolatie. - grondwaterstroming kan worden verminderd met groutschermen
3	- instabiliteit / lekkage van de bevroren grond	- te <i>lage sterkte en stijfheid</i> van bevroren grond - niet-waterdicht / lekkage gedurende afgraving - onvoldoende temperatuurcontrole	- (in-)stabiliteit van het onbevroren grondmassief wordt gecontroleerd door de temperatuur (voldoende sterkte en stijfheden van bevroren grond wordt gegenereerd vanaf ca. -15 °C). Hogere temperaturen kunnen in kleisoorten met zoutwater problemen opleveren.
4	- maaiveldzetting	- vries-dooi consolidatie - verplaatsing tunnel	- vries-dooi consolidatie kan bij beevriezing van slappe kleisoorten maaiveldddaling tot gevolg hebben. - significante verplaatsing van de hoofdtunnels kan theoretisch leiden tot (lokale) maaiveldddaling; - maatregelen hier tegen zijn niet duidelijk.
5	- dwarsverbinding niet waterdicht na ontdooiing	- lekken in aansluitingen	- aanbrengen van speciale waterafdichtende folie.

12. CONCLUSIES

De eerste doelstelling van het F100-project om de veldmeetgegevens gedurende het vriesproces te meten en vervolgens te analyseren is meer dan geslaagd. De gegevens van de monitoringcampagne bij DV1 en DV2 hebben zeer veel relevante gegevens en ervaring opgeleverd.

Deformatie van de grond en tunnel bij een bevroren grondmassief is een gecombineerd effect van vorstheffing, temperatuurcontrole en ontgraving. De ontwikkeling van de temperatuur, de deformatie van grond, tunnel en omgeving kunnen voor het grootste deel verklaard worden.

De waterdrukmetingen van de bevroren grond onder nul °C zijn niet gelukt en de verticale maaiveld daling boven de bevroering van DV1 en DV2 zijn niet bruikbaar gebleken vanwege uitvoeringsfouten.

De tweede doelstelling om de effecten op de hoofdtunnelconstructie gedurende het vriesproces integraal te verklaren is eveneens grotendeels gehaald. Met name de deformatieprocessen zijn geanalyseerd vanuit vorstuitzetting en vorstgevoeligheid van verschillende grondsoorten.

De derde doelstelling om meer inzicht krijgen in praktische aspecten van uitvoering bij de aanleg van dwarsverbindingen met AGF is gerealiseerd. Vele praktische werkmethodieken en maatregelen zijn onderzocht en toegelicht. Maatregelen voor verbetering zijn voorgesteld om risico's te minimaliseren.

De toepassing van kunstmatige grondbevriezing brengt een aantal risico's met zich mee tijdens de uitvoering. Deze risico's kunnen bij voldoende kennis van de eigenschappen van de grond en het specifieke bouwproces beheerst worden. De grootste risico's bij het gebruik van AGF zijn:

- volume-expansie van de bevroerende grond
- verhoging waterdruk
- waterdichtheid van het bevroren grondmassief
- te lage sterkte en stijfheid van bevroren grond
- vries-dooi consolidatie (verlies grondvolume)

De gevolgen van deze risico's zijn als volgt geïdentificeerd:

- vervorming tunnel
 - voegverplaatsing
 - breuken in tunnelsegmenten
 - lekkage tijdens en na bevroering (op aansluiting dwarsverbinding en hoofdtunnel).
- instabiliteit bevroren grondmassief
- maaiveldvervorming (bodemdaling of opheffing)

Variaties van grondspanning, waterdruk en deformatie van de grond zijn in alle bouwfasen van de dwarsverbinding herkenbaar.

De ontwikkeling van grondspanning en tunneldeformatie zijn afhankelijk van:

- grondsoort
- temperatuur en drainage
- isolatiemaatregelen
- tijdstip en duur ontgraving

Deformatie van de tunnel

De deformatie van de hoofdtunnelbuizen wordt voornamelijk veroorzaakt door de uitzetting van de bevrozende grond en de opsluiting van water. Om vervormingen van de aangrenzende grond bij de ondergrondse constructies te verminderen is het aan te raden het temperatuurveld zodanig te kiezen dat er nauwelijks temperatuurgradiënten loodrecht op constructies ontstaan. Het wordt daarnaast aanbevolen in goed-doorlatende grondsoorten een drainagevoorziening (of drukventiel) aan te leggen in het hart van de te realiseren dwarsverbinding. Helaas zijn voor slecht doorlatende gronden geen maatregelen bekend om dit effect tegen te gaan en zal rekening gehouden moeten worden met relatief grote krachten.

Isolatie

Ten behoeve van een goede waterdichte aansluiting van het ijslichaam op de ondergrondse constructies is het noodzakelijk (actieve) isolatie te plaatsen om storende toestroming van warmte naar de beoogde bevroren grond te vermijden. De isolatie wordt dan aangebracht op de tunnelwand of de constructie die naar verwachting warmte geleidt.

Monitoring

Een correcte temperatuurprognose is belangrijk voor de uitvoering. Zowel temperatuurontwikkeling van de grond als van de tunnelsegmenten is van even groot belang. Het temperatuurverloop kan goed en relatief eenvoudig worden bepaald. Het wordt sterk aanbevolen de deformatie en verplaatsing van de aanpalende (ondergrondse) constructies te monitoren. Tevens is monitoring van de temperatuur van de grond en de aangrenzende constructies essentieel om het vriesproces te kunnen beheersen.

De waterdichtheid van een bevroren grondmassief is zeer belangrijk voor de veiligheid in de tunnel. Door gegevens van de temperatuurmonitoring van grond en tunnelsegmenten te combineren is het mogelijk de waterdichtheid van het cilindrische bevroren grondlichaam te garanderen. Het risico van lekkages is groot direct langs de relatief warme hoofdtunnelbuizen en in aquifers met zout water.

Reductie vriesdruk en drainage

Het wordt sterk aanbevolen het onbevroren hart vroegtijdig te draineren om de tunneldeformatie te minimaliseren. Het draineren van het onbevroren hart van kleigrond heeft slechts een beperkt effect op het minimaliseren van de tunneldeformatie. Dit komt doordat de vriesspanning van het cilindrisch bevroren grondmassief ook bij openen van het veiligheidsventiel op de tunnelwanden behouden blijft (of zelfs lokaal wordt vergroot).

Zout water

Het zoutgehalte van de aquifer Z₁ bij DV₁ heeft geleid tot lokale verhoging van de zoutconcentratie, waarschijnlijk door de grondbevrozing (dit gebeurt door segregatie van zoutmineralen die in oplossing blijven en de grond). Het is niet met zekerheid vast te stellen dat dit geleid heeft tot problemen met de waterdichtheid van bevroren grondmassief bij DV₁.

Aanbevelingen

In het hoofdstuk Aanbevelingen worden de resultaten van dit project gepresenteerd als een leidraad met praktische aanbevelingen. Deze betreffen de volgende onderwerpen:

1. lokaal geologisch en geohydrologisch onderzoek;

2. laboratoriumonderzoek van geomechanische eigenschappen van bevroren grond;
3. controle van temperatuur en waterdichtheid van een bevroren grondlichaam;
4. controle van vriesspanningen;
5. uitvoeringsproblemen, maatregelen en verhoging van toleranties.

Conclusies

Gebleken is dat de toepassing van AGF in de tunnelbouw goed mogelijk is bij voldoende kennis van de eigenschappen van de grond en een deskundige toepassing. Significante schade aan ondergrondse constructies kan ontstaan als het vriesproces onvoldoende beheerst wordt.

Door het F100-praktijkproject is veel noodzakelijke en praktische kennis opgebouwd om de uitvoeringsrisico's van AGF bij gebruik in de tunnelbouw te minimaliseren. Door middel van dit praktijkonderzoek is deze kennis praktisch toepasbaar geworden voor de Nederlands tunnelbouw.

13. AANBEVELINGEN VOOR NADER ONDERZOEK

Op basis van dit onderzoek en de ervaringen bij de Westerscheldetunnel wordt een aantal kernpunten aangewezen voor toekomstig wetenschappelijk onderzoek van kunstigmatige grondbevriezing.

PRAKTIJKONDERZOEK KRACHTOVERDRACHT EN KRUIP (DRUKSENSOR)

In de praktijk zal door kruip van het ijslichaam de belasting op het spuitbeton van de dwarsverbinding toenemen. Met drukdozen in het ijslichaam en de dwarsconstructie kan de krachtoverdracht gemeten worden. Op deze wijze kunnen kruipprocessen van een bevroren grondmassief bestudeerd worden.

MONITORING VAN VORSTUITZETTING

Om het drie-dimensionale uitzettingsgedrag van andere grondsoorten dan zand en stijve klei te leren kennen en tijdig maatregelen te kunnen nemen wordt het aanbevolen bij alle AGF-projecten in Nederland monitoring uit te voeren van grond- en tunneltemperatuur, grondspanningen en tunneldeformatie. Met het uitzettingsgedrag van grondsoorten – zoals silten, venige klei, veen en gemengde grondsoorten en veen – is nog weinig tot geen ervaring in Nederland.

DELFT CLUSTER

Bij Delft Cluster zijn verschillende grondsoorten uni-axiaal bevroren om de vorstheffing te meten en de relatie te verkennen met grondspanning. Resultaten worden in het najaar van 2002 verwacht.

MAXIMALE VRIESDRUK

Uit de literatuur is bekend dat een maximale vriesdruk ontstaat. Daarnaast is uit de metingen ook naar voren gekomen dat een maximale druk ontstaat tegen de tunnelwand. Het is daarom zinvol niet alleen de uitzetting te meten onder constante spanning, maar ook onder maximaal optredende vriesdruk. Bij de dimensionering van constructies kan dan rekening worden gehouden met de maximaal optredende vriesdruk.

SOFTWARE ONTWIKKELING

Temperatuurberekeningen

Een correcte voorspelling van het temperatuurveld bij AGF-projecten is van belang voor de waterdichtheid van het vrieslichaam. De voorspelling van een correct temperatuurprofiel is van essentieel belang voor het gebruik van grondbevriezing in de tunnelbouw. Vooral de koppeling van het temperatuurveld met de mechanismen voor de aanzuiging van water speelt een belangrijke rol bij de uitzetting van de grond. De ontwikkeling van een eenvoudig te gebruiken rekengereedschap om het temperatuurprofiel in drie dimensies beter te kunnen voorspellen is alleen zinvol als een eenvoudige koppeling met de sterkte en de stijfheid van de grond voorhanden is.

Berekeningen van vriesspanningen en deformatie

De temperatuurontwikkelingen bepalen, samen met de eigenschappen van de grondlagen (elasticiteit, drainage/water-doorlatendheid en het onbevroren watergehalte), de vriesuitzetting. Op basis van de tot op heden ontwikkelde kennis van vriesuitzetting moet het mogelijk zijn een geïntegreerde driedimensionale berekening te maken van spanningsontwikkelingen bij kunstmatige grondbevriezing. Het is aan te bevelen deze software te ontwikkelen met een 3D-eindige elementenprogramma. Wanneer wordt gewerkt aan een numeriek gereedschap om bevroren grond te modelleren is het noodzakelijk kruipprocessen hierin mee te nemen.

LANDELIJKE DATABASE

Om de kennisopbouw en het gebruik van kunstmatige grondbevriezing in Nederland te stimuleren is het in gebruik nemen van een (openbare) centrale databank voor sterkte, uitzetting, spanningsontwikkeling, kruip en andere uitvoeringsaspecten een mogelijkheid. In de databank zouden dan ook de laboratoriumtestcondities, grondparameters en in-situ lokale grondomstandigheden moeten zijn opgenomen.

14. LITERATUUR

- Andersland , O.B. & B. Ladanyi (1994) An introduction to frozen ground engineering. Chapman Hall, pp.352
- Anderson, D. & A.R. Tice (1972) Predicting unfrozen water contents in frozen soils from surface area measurements. In: Frost Action in soils. Washington D.C.: National Academy of Sciences, pp.12-18 (Highway Res. Rec. 393)
- Arnold, D.C. (1985) Ground treatment for the three valleys tunnel. In: Tunnel and Tunneling, October 1985, pp. 35-38
- Assur, A. (1963) Creep of frozen soil (discussion). Proc. 1st Permafrost Int. Conf. Nat. Acad. Sci. Publ. 1287, pp.339
- Autori varii, (1985) Artificial ground freezing in Belgium. In: Proc. ISSMG 1885, San Francisco, California
- Bourbonnais, J. & B. Landanyi (1985a) The mechanical behaviour of frozen clay down to cryogenic temperatures. In: "4th Int. Symp. on Grondfreezing, Sapporo, 5-7 August 1985, Vol. 2" (eds. S. Kinoshita & M. Fukuda) , pp. 237-244
- Bourbonnais, J. & B. Landanyi (1985b) The mechanical behaviour of frozen sand down to cryogenic temperatures. In: 4th Int. Symp. on Grondfreezing, Sapporo, 5-7 August 1985, Vol. 1 (eds. S. Kinoshita & M. Fukuda) , pp.235-244
- Chamberlain, E.J. (1983) Frost heave of saline soils. In: *Proc 4th IC on Permafrost, Fairbanks*, pp.121-126
- Côté H., Thimus J.-F., Rijkers R., Naaktgeboren M. (2000) Soil behaviour during artificial freezing – Part 1: Frost heaving 3D tests, In: ISGF2000 - Frost action in soils (ed. J.F. Thimus), Louvain-la-Neuve, pp. 69-75
- Czurda, K.A. (1983) Freezing effects on soils: comprehensive summary of the ISGF 82. *Cold Regions Sci. Technol.*, 8, pp.93-107
- Czurda, K.A. & J.F. Wagner (1985) Frost heave in fresh water clays. In: 4th ISGF, Sapporo, August 1985, pp.129-136
- Domaschuk, L., S. Knutson, D.H., Shields & M.G. Rahman (1985) Creep of frozen sand under isotropic and deviatoric components of stress. *J. Energy Resour. Tech.*, 107-2, pp.199-203
- Gardner, A.R. (1982) Strength and creep testing of frozen soils. In: *Proc, 3rd Hanover NH, USA*, 1, 53-60
- GeoDelft (1995a) Westerschelde oeververbinding Geotechnische interpretatie grondonderzoeken, CO-350690/378

- GeoDelft (1995b) Westerschelde oeververbinding Geotechnische opinie Boomse Klei, CO-350690/352
- GeoDelft (1999) F100 Meet en instrumentatieplan, Factual report nr. CO-390501.061
- GeoDelft (2000) Installatie Instrumenten Praktijkonderzoek dwarsverbindingen Westerscheldetunnel, Factual report CO-390501/61, GeoDelft F100
- Gonze, P., Lejeune, M., Thimus, J.F., Monjoie, A. (1985) Sand ground freezing for the construction of a subway station in Brussels. In: *Proc. 4th Int. Symp. on Ground Freezing*, Sapporo, pp. 277-283
- Harris, J.S. (1995) Ground freezing in practice, Thomas Telford Ltd. London, pp 264
- Hass, H, R. Jagow-Klaff & H.W. Seidel (2000) Use of brine freezing for the construction of the traverse galleries. In: ISGF2000 - Frost action in soils (ed. J.F. Thimus), Louvain-la-Neuve, pp. 289-294
- Hölting, B. (1989) Hydrogeologie, 3rd ed. Ferdinand Enke, Stuttgart
- HSL-Zuid (1999) Boortunnel Groene Hart, Bevriezen van grond; State of the Art, Inventarisatie kennisleemten
- ISGF (1987) International Symposium Ground Freezing; zie Sayles et al. (1987)
- ISSMFE (1989) Work report 1985-1989 of the technical committee on Frost TC8, *Frost in engineering* (ed. Rathmeyer, H.) IS VTT94 Espoo Finland, 1, pp.15-70
- Jessberger, H.L. (1989) Determination of frost susceptibility of soils. In: *Proc. Int. Symp. Frost Geotech. Eng., Saariselka, March 1989, Espoo, VTT*, Vol. 2, pp.449-469
- Jessberger/Jakow-Klaff (1996) Frost im Bergbau. In: *Grundbau-Taschenbuch*, Ernst & Sohn Berlin, Fünfte Auflage, ISBN 3 433 01442 6, pp.497-534
- Jessberger, H.L. & P. Jordan (1982) Frozen saline sand subjected to dynamic loads. *Proc. 3rd ISGF Hanover NH*, 1, pp.19-26
- Jessberger+Partners (1998) Westerscheldetunnel, Vereisung der Querschlag; Projekt-Nr. B82592
- Johansen, Ø. (1975) Thermal conductivity of soils. PhD diss. Norwegian Technical Univ, Trondheim; also US Army Cold Reg. Res. Eng. Lab. Transl. 637, July 1977
- Jessberger (1982) Applications of ground freezing to soil improvement in engineering practice. In: *Proc. on recent Improvements in Ground Improvement techniques*, Bangkok, Nov. 469-482.

- Jones R. (1989) Background, history and literature (on ground freezing); Introduction to the basic properties of freezing, frozen en thawing soils. In: Proc. 5th NSGF Nottingham, pp. 14-29
- Knutsson S., L. Domaschuk & N. Chandler (1985) Analysis of large scale laboratory and in-situ frost heave tests. In: 4th Int. Symp. on Ground Freezing, Sapporo, 5-7 aug. 1985, pp.65-70
- Kofoed, N. & S.R. Doran (1996) Storbaelt Eastern Railway Tunnel, Denmark, Ground Freezing for tunnels and cross passages. In: *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft ground*, Balkema Rotterdam 1996, pp. 391-398
- Konrad, J.M. (1987) Procedure for determining the segregation potential of freezing soils. Geotech. Test J. ASTM 10(2), pp.51-58
- Konrad, J.M. & N.R. Morgenstern (1980) A mechanistic theory of ice lens formation in fine grained soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 17 pp.473-486
- Konrad, J.M. & N.R. Morgenstern (1981) The segregation potential of a freezing soil, *Cndn Geotech. J.* 18, pp.482-491
- Konrad J.M. (2000) Assessment of subgrade frost susceptibility from soil index parameters, In: *ISGF2000, Frost action in soils* (ed. J.F. Thimus), Louvain-la-Neuve, pp. 89-95.
- Kooijman, G., M. Naaktgeboren, R. van Beek (2001) Westerscheldetunnel. Cement, nr 1.
- Ladanyi, B. (1982) Ground pressure development on artificially frozen soil cylinder in shaft sinking, Amici at Alumni. Em. Prof. Dr. E.E. De Beer, pp. 187-194
- Ladanyi, B. & M. Shen (1985) Mechanics of freezing and thawing soils. In: *Proc. Int. Symp. Frost geotech. Eng., Saariselka, March 1989*, Espoo, VTT 1984, Vol. 1, pp.73-103
- Ladanyi, B. and Johnston, G.H. (1973) Evaluation of in situ creep properties of frozen soils with the pressuremeter
- Mesman, T.J. (1999) CUR-COB Grondbevriezing uitvoeringspraktijk commissie M530-01, 31 pp, met bijlagen.
- Miller, R.D. (1972) Freezing and heaving of saturated sand and unsaturated soils. US Highway Research Record, 393, pp.1-11
- Murray, M.J., Eskessen, S.D. (1997) Design and construction of cross passages at the Storebaelt Eastern railway tunnel. Proc. Tunneling 97, London, UK, pp. 463-479
- NEN5117 (1991) Bepaling van schuifweerstand- en vervormingsparameters van grond – Triaxiaalproef, Nederlands Normalisatie Instituut, Delft, 31 pp.
- Nixon, J.F. & N.R. Morgenstern (1973) The residual stress in thawing soils. *Cndn Geotech. J.*, 10-4, 571-580

- Nixon, J.F. (1987) Discrete ice lens theory for frost in soils. *Cndn Geotech. J.*, 28, 843-859
- Ogata, N., M. Yasuda & T. Kataoka (1982) Salt concentrations effects on strength of frozen soils. In: *Proc. 3rd Int. Symp. Ground Freezing, Hanover NH*, pp.3-10
- Penner (1963) Heaving pressure in soils during unidirectional freezing, *Cndn Geotech. J.*, 4, pp.398-408
- Penner, E. (1986) Aspects of ice lens growth in soils. *Cold Regions Sci. & Tech.*, 13, pp.91-100
- Peters, A.J.M., Naaktgeboren, N.M. & Rijkers, R.H.B. (2000) Techniek van de koude grond. Land en Water 2000, nr. 7/8, pp.
- Ponomarjov, V.D. (1982) Temperature deformations of frozen soils. In: *Proc. 3rd Int. Symp. Ground Freezing Hanover, NH*, pp.125-129
- Rijkers, R, Naaktgeboren, M., Côté, H., Thimus, J.-F., Visschedijk M. (2000) Soil behaviour during artificial freezing – Part 2: Application in bored tunnels, In: *ISGF2000 - Frost action in soils* (ed. J.F. Thimus), Louvain-la-Neuve, pp. 237-242
- Sayles, F.H., H.W. Baker, F. Gallavres, H.L. Jessberger, SKinosita, A.V. Sadovskiy, D. Sego & S.S. Vyalov (1987) Classification and laboratory testing of artificially frozen ground, *Journ. of Cold Regions Engineering*, Vol. 1, pp 22-48
- Shuster, J.A. (2000) Grond freezing failures: causes and prevention. In: *Ground freezing* (ed. J.F. Thimus), *ISGF2000*, Louvain-la-Neuve, Belgium, pp. 333-338.
- Sutherland, H.B. & P.N. Gaskin (1973) Pore water and heaving pressures developed in partially frozen soils. In: *Proc. 2nd IC on Permafrost Yakutsk*, pp.409-419
- Thimus, J.F., G. Henriët, Colin, P., You, Th. (1991) Rheological behaviour of overconsolidated clay measured by creep test - Application to cryogenic storage. In: *Ground Freezing 91*, (ed. Yu & Wang, Balkema, R'dam, pp.181-188
- Tice, A.R., D.M. Anderson & A. Banin (1976) The prediction of unfrozen water contents in frozen soils from liquid Limit determinations. U.S. Army Cold Reg. Res. Eng. Lab. CRREL rep. 76-8
- TNO-NITG (1998) Het effect van een vries-dooi cyclus op het mechanisch gedrag van de klei van Boom bij de Westerscheldetunnel, NITG 98-22-B, 44 pp., 5 bijlagen
- TNO-NITG (2000) Het vervormingsgedrag van bevroren grond. Resultaten van vriesexperimenten en numerieke simulatie, rap. nr. NITG 99-232-B voor HSL-Zuid, pp. 105

- Van Beek, R.J., Naaktgeboren, N.M., Rijkers, R.H.B. (2000) Praktijkonderzoek bij de Westerscheldetunnel, F100, Vriezen van dwarsverbindingen. COB-Nieuws 2000, nr. 2.
- Van Beek, R.J., Heijboer, J., Worm, E.W. (1999) The Westerscheldetunnel; Connection function, financing and safety aspects. Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 14, No. 2, pp 161-169
- Van der Linden, F.W.J., Sonke, E.J., The Westerscheldetunnel (1997) Mastering design and construction challenges, AITES-ITA 2000 World Tunnel Congress, Technical (Ed. R.G. Stimson and J.L. Stimson)
- Van der Meijden, V. (2002) Stageverslag “Grondbevriezen”, TU-Delft, augustus 2001
- WOV/GD (1995a) Geotechnische opinie Klei van Boom, Westerschelde Oeververbinding, CO-350690/352
- WOV/GD (1995b) Geotechnische interpretatie van grondonderzoeken, Westerschelde Oever Verbinding, CO-350690/378
- Yong, R.N. & B.P. Warkentin (1975) Soil properties and behavior. Amsterdam, Elsevier.
- Yu, X. & C. Wang (1991) Structur and stress analysis of seepage resistance linings in shafts sunk with freezing method. In: *Proc. 5th ISGF, Nottingham*, 1, 311-320

BIJLAGE A

DV1 ACTIVITEITENLOGBOEK

		Voorbereidingen	Vriezen (100% en 33% vriescapaciteit)	Dooien (vriemachine uit)	Ontgraven	Bekleden en afwerking
14-Feb-00	Start bouw steiger t.b.v. boringen vrieslansen					
23-Feb-00	Boren ontwateringsbuis					
29-Feb-00	Boren eerste vriesbuis					
28-Mar-00	Boren laatste vriesbuis					
04-Apr-00	Aanbrengen verstevigingsbalken oostbuis					
06-Apr-00	Installeren vriesunit					
11-Apr-00	Opbouw leidingen					
21-Apr-00	Monteren nooddeur westbuis					
22-Apr-00	Monteren verstevigingsbalken westbuis					
01-May-00	Aanbrengen isolatie op tunnelwand westbuis					
03-May-00	Start inregelen vriesmachine					
08-May-00	Nogmaals opstarten vriesmachine					
12-May-00	Vriesmachine draait op 66%					
16-May-00	Vriesmachine tijdelijk uitgeschakeld en filters verwisseld					
16-May-00	Vriesmachine draait op 100%					
23-May-00	Testen nooddeur					
24-May-00	Testen nooddeur					
29-May-00	Testen nooddeur					
06-Jun-00	Dichtlassen nooddeur					
13-Jun-00	Ontluchten ringleiding					
14-Jun-00	Plaatsen droogijs op staaltubbing west					
19-Jun-00	Plaatsen droogijs op staaltubbing west					
20-Jun-00	Plaatsen droogijs op staaltubbing west					
22-Jun-00	Water afgevoerd 160 ltr 11.45-13.45 uur					
23-Jun-00	Water afgevoerd 2370 ltr om 14.00 uur					
25-Jun-00	Water afgevoerd 11445 ltr om 11.00 uur					
25-Jun-00	Water afgevoerd 11819 ltr om 12.50 uur					
28-Jun-00	Plaatsen droogijs op staaltubbing west					
29-Jun-00	Plaatsen droogijs op staaltubbing west					
30-Jun-00	Aanbrengen isolatie op tunnelwand oostbuis					
30-Jun-00	Plaatsen droogijs op staaltubbing west					
03-Jul-00	Extra isolatie rond leidingdoorvoeringen oost					
05-Jul-00	Extra isolatie rond leidingdoorvoeringen oost					
06-Jul-00	Aanbrengen isolatie op tunnelwand oostbuis					
06-Jul-00	Openen deur westzijde, start ontgraven					
07-Jul-00	Afbranden nokken op staaltubbing west					
07-Jul-00	Aanbrengen isolatie op tunnelwand oostbuis					
13-Jul-00	Plaatsen droogijs op staaltubbing west					
14-Jul-00	3 kernen geboord voor COB					
14-Jul-00	s avonds einde ontgraven					

19-Jul-00	Lassen stalen strip aan staaltubbing west					
20-Jul-00	Lassen stalen strip aan staaltubbing west					
21-Jul-00	Lassen stalen strip aan staaltubbing west					
22-Jul-00	Lassen stalen strip aan staaltubbing oost					
23-Jul-00	Openen deur oostzijde					
24-Jul-00	Verder openen deur oostzijde					
24-Jul-00	Plaatsen droogijs op staaltubbing west					
25-Jul-00	Voorbereiden bouw binnenmantel (wapening, folie, afdichtrubber etc)					
26-Jul-00	3 kernen geboord voor COB in de Sohle					
01-Aug-00	Vriesmachine terug naar 33 %					
02-Aug-00	Plaatsen droogijs op staaltubbing west					
03-Aug-00	Storten vloer					
04-Aug-00	Afbranden nokken op staaltubbing oost					
07-Aug-00	Ontkisten vloer					
07-Aug-00	Afbranden nokken op staaltubbing oost/west					
08-Aug-00	Start aanbrengen wapening wand en plafond					
14-Aug-00	Nokken verder afbranden					
15-Aug-00	Start montage bekisting					
21-Aug-00	Storten wanden en plafond					
28-Aug-00	Ontkisten wanden en plafond					
07-Sep-00	Einde vriesproces, start demontage vriesinstallatie					
07-Sep-00	Begin trekken vriesbuizen					
08-Sep-00	Temperatuurmetingen losgekoppeld					
14-Sep-00	Laatste vriesbuis getrokken					
15-Sep-00	Demontage isolatie					
18-Sep-00	Demontage bovenste verstevigingsbalk oostzijde					
23-Sep-00	Inboren injectienippels i.v.m. lekkages					
6-Dec-00	Oostbalken HEA600/800/100 verwijderd					
8-Dec-00	Diverse injecties t.p.v. lekkages					
18-Jan-01	West verwijderen werkvloer en verstevigingsbalken					
19-Jan-01	Nooddeur verwijderd					

BIJLAGE B

DV2 ACTIVITEITENLOGBOEK

		Voorbereidingen	Vriezen (100% en 33% vriescapaciteit)	Dooien (vriesmachine uit)	Ontgraven	Bekleden en afwerking
30-Mar-00	Start bouw steiger vriesbuizen					
10-Apr-00	Start boren eerste vriesbuis					
8-May-00	Einde boren vriesbuizen					
14-May-00	Aanbrengen verstevigingsbalken oost					
16-May-00	Start bouw steiger vriesleidingen					
16-May-00	Plaatsen vriesmachine					
30-May-00	Aanbrengen isolatie rond leidingen					
7-Jun-00	Plaatsen nooddeur					
8-Jun-00	Aanbrengen verstevigingsbalken west					
14-Jun-00	Aanbrengen isolatie tunnelwand west					
15-Jun-00	12.00 start vriesproces 1e unit op 40%					
16-Jun-00	Vriesproces 100 %					
20-Jun-00	Ruimte in staaltubbing gevuld met zand i.v.m. isolatie					
3-Jul-00	Reparatie vriesmachine					
10-Jul-00	Aanbrengen extra isolatie op tunnelwand oost en doorgang vriesbuizen					
11-Jul-00	Aanbrengen extra isolatie wand oostbuis					
19-Jul-00	Ontwatering door gat 16 mm in betonnen deur 6 ltr/uur					
26-Jul-00	Storing vriesmachine, reparatie tot 27-7					
27-Jul-00	Vriesmachine gerepareerd, weer opstarten om 16.00 uur					
9-Aug-00	Testen nooddeur					
16-Aug-00	Dichtlassen naad nooddeur-staaltubbing					
17-Aug-00	Testen nooddeur					
22-Aug-00	5 boringen 16 mm in tunnelwand i.v.m. controle ijslichaam					
28-Aug-00	Openen deur west, start ontgraven					
31-Aug-00	Aanbrengen droogijs op staaltubbing west					
5-Sep-00	Vriesmachine naar 33%					
5-Sep-00	Einde ontgraven					
6-Sep-00	Lassen afdichtingsstrip westzijde					
7-Sep-00	Lassen afdichtingsstrip oost- en westzijde					
8-Sep-00	Lassen afdichtingsstrip oost- en westzijde					
9-Sep-00	Lassen afdichtingsstrip oostzijde					
10-Sep-00	Openen deur oost					
11-Sep-00	Afbranden stalen nokken, afdichten strippen					
12-Sep-00	Start werkzaamheden vloer (wapening, afdichtrubber, folie etc.)					
18-Sep-00	Storten vloer					
20-Sep-00	Ontkisten vloer, start wanden en plafond					

20-Sep-00	3 kernen geboord in spuitbeton t.b.v. COB					
22-Sep-00	Afbranden stalen nokken					
28-Sep-00	Aanbrengen bekisting wanden en plafond					
2-Oct-00	Aanbrengen beton wanden en plafond					
9-Oct-00	Ontkisten wanden en plafond					
26-Oct-00	Vriesinstallatie uitgezet om 10.00 uur					
2-Nov-00	Verwijderen isolatie oostbuis					
10-Nov-00	Start afbranden vrieslansen					
13-Nov-00	Afbranden vrieslansen					
14-Nov-00	Afbranden vrieslansen					
15-Nov-00	Verwijderen betonresten m.b.v. sloophamer					
21-Nov-00	Diverse kernboringen in beton binnenmantel					
15-Dec-00	Verwijderen steunbalken HEA 600/800/1000					
18-Dec-00	Injecteren diverse lekkages					

BIJLAGE C

- C1 POSITIE VAN SEGMENTRINGEN, WESTBUIS**
(KMW tek. W-TU3-VBO-527-g)
- C2 INGEMETEN POSITIE VAN TEMPERATUURVOELERS IN MEETLANSEN,
OOSTBUIS DV1**
(KMW tek. W-TU4-HC5-851-c)
- C3 INGEMETEN POSITIE VAN TEMPERATUURVOELERS IN MEETLANSEN,
OOSTBUIS DV2**
(KMW tek. W-TU4-HC5-852-a)
- C4 TEMPERATUURVOELERS OP STAALSEGMENTEN, OOSTBUIS**
(KMW tek. W-TU3-VBO-665-d)
- C5 POSITIE TEMPERATUURVOELERS, WESTBUIS**
(KMW tek. W-TU4-BT3-001)

De tekeningen treft u achterin dit rapport aan.

**C2 INGEMETEN POSITIE VAN TEMPERATUURVOELERS IN
MEETLANSEN, OOSTBUIS DV1
(KMW TEK. W-TU4-HC5-851-C**

**C3 INGEMETEN POSITIE VAN
TEMPERATUURVOELERS IN MEETLANSEN, OOSTBUIS
DV2
(KMW TEK. W-TU4-HC5-852-A**

**C4 TEMPERATUURVOELERS OP STAALSEGMENTEN,
OOSTBUIS
(KMW TEK. W-TU3-VB0-665-D)**

**C5 POSITIE TEMPERATUURVOELERS, WESTBUIS
(KMW TEK. W-TU4-BT3-001)**

BIJLAGE D

TABEL MET LOCATIE VAN OPNEMERS METINGEN B VAN DV1 EN DV2

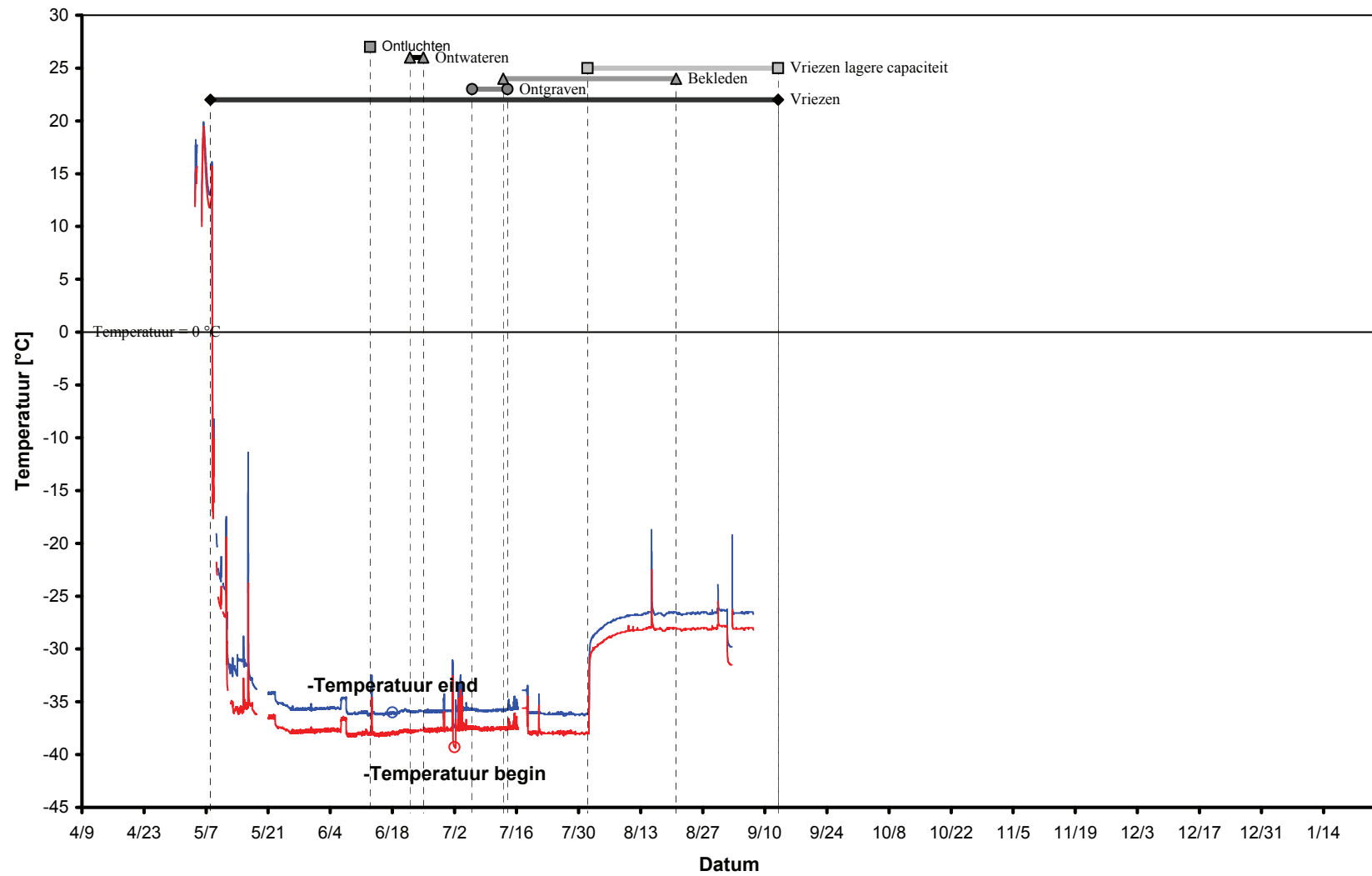
Instr. nr	dv	x_coordinaat[m]	y_coordinaat[m]	z_coordinaat [m]	vanaf maaiveld tot
ex1-1	1	44301.614	373578.243	-13.4	hart anker
ex1-2	1	44301.61	373578.239	-11.4	hart anker
ex1-3	1	44301.605	373578.235	-9.4	hart anker
ex1-4	1	44301.6	373578.231	-7.4	hart anker
ex2-1	1	44307.319	373578.236	-13.4	hart anker ex2-1
ex2-2	1	44307.317	373578.233	-11.4	hart anker ex2-2
ex2-3	1	44307.316	373578.23	-9.4	hart anker ex2-3
ex2-4	1	44307.314	373578.227	-7.4	hart anker ex2-4
ex3-1	2	44302.599	373826.015	-24.7	hart anker ex3-1
ex3-2	2	44302.593	373826.012	-22.75	hart anker ex3-2
ex3-3	2	44302.587	373826.009	-20.69	hart anker ex3-3
ex3-4	2	44302.582	373826.006	-18.69	hart anker ex3-4
ex4-1	2	44310.855	373826.087	-24.7	hart anker ex4-1
ex4-2	2	44310.865	373826.078	-22.7	hart anker ex4-2
ex4-3	2	44310.875	373826.07	-20.94	hart anker ex4-3
ex4-4	2	44310.886	373826.057	-17.82	hart anker ex4-4
he1-a	1	44301.53	373582.85	-31	onderkant hellingmeetbuis
he1-b	1	44301.53	373582.85	-31	onderkant hellingmeetbuis
he2-a	1	44307.367	373582.751	-31	onderkant hellingmeetbuis
he2-b	1	44307.367	373582.751	-31	onderkant hellingmeetbuis
he3-a	2	44302.569	373830.525	-41	onderkant hellingmeetbuis
he3-b	2	44302.569	373830.525	-41	onderkant hellingmeetbuis
he4-a	2	44310.432	373830.714	-40	onderkant hellingmeetbuis
he4-b	2	44310.432	373830.714	-40	onderkant hellingmeetbuis
sc1-1	1	44307.774	373582.394	-17.47	sc1-1 hart opnemer
sc1-2	1	44307.774	373582.394	-17.33	sc1-2 hart opnemer
sc2-1	1	44307.868	373581.411	-17.47	sc2-1 hart opnemer
sc2-2	1	44307.868	373581.411	-17.33	sc2-2 hart opnemer
sc3-1	1	44307.836	373575.283	-17.17	sc3-1 hart opnemer
sc3-2	1	44307.836	373575.283	-17.03	sc3-2 hart opnemer
sc4-1	1	44301.057	373574.083	-17.17	sc4-1 hart opnemer
sc4-2	1	44301.057	373574.083	-17.03	sc4-2 hart opnemer
sc5-1	2	44311.437	373830.411	-28.67	sc5-1 hart opnemer
sc5-2	2	44311.437	373830.411	-28.53	sc5-2 hart opnemer
sc6-1	2	44311.424	373829.314	-29.17	sc6-1 hart opnemer
sc6-2	2	44311.424	373829.314	-29.03	sc6-2 hart opnemer

sc7-1	2	44311.637	373823.077	-28.37	sc7-1 hart opnemer
sc7-2	2	44311.637	373823.077	-28.23	sc7-2 hart opnemer
sc8-1	2	44302.044	373821.849	-28.37	sc8-1 hart opnemer
sc8-2	2	44302.044	373821.849	-28.23	sc8-2 hart opnemer
sm1-1	1	44305.807	373582.813	-17.5	hart opnemer
sm1-2	1	44305.807	373582.813	-17.35	hart opnemer
sm1-3	1	44305.807	373582.813	-17.07	hart opnemer
sm1-4	1	44305.757	373582.813	-17.43	hart opnemer
sm2b-1	1	44287.227	373573.553	-17.3	hart opnemer
sm2b-2	1	44287.227	373573.553	-17.15	hart opnemer
sm2b-3	1	44287.227	373573.553	-16.95	hart opnemer
sm2b-4	1	44287.727	373573.553	-17.22	hart opnemer
sm3-1	2	44309.472	373830.617	-28.8	hart opnemer
sm3-2	2	44309.472	373830.617	-28.64	hart opnemer
sm3-3	2	44309.472	373830.617	-28.35	hart opnemer
sm3-4	2	44309.472	373830.617	-28.7	hart opnemer
sm4-1	2	44309.532	373821.639	-28.5	hart opnemer
sm4-2	2	44309.532	373821.639	-28.09	hart opnemer
sm4-3	2	44309.532	373821.639	-27.77	hart opnemer
sm4-4	2	44309.532	373821.639	-28.44	hart opnemer
te1-1	1	44303.1	373578.22	-13.7	hart opnemer
te1-2	1	44303.097	373578.22	-11.7	hart opnemer
te1-3	1	44303.091	373578.22	-9.7	hart opnemer
te1-4	1	44303.085	373578.22	-7.7	hart opnemer
te1-5	1	44303.084	373578.22	-2.5	hart opnemer
te1-6	1	44303.08	373578.22	-0.5	hart opnemer
te2-1	2	44304.131	373825.895	-25	hart opnemer
te2-2	2	44304.123	373825.901	-23	hart opnemer
te2-3	2	44304.115	373825.907	-21	hart opnemer
te2-4	2	44304.107	373825.913	-19	hart opnemer
te2-5	2	44304.039	373825.965	-2.5	hart opnemer
te2-6	2	44304.031	373825.971	-0.5	hart opnemer
vw1-1	1	44305.807	373578.213	-13.7	hart opnemer
vw1-2	1	44305.807	373578.213	-10.7	hart opnemer
vw3-1	2	44309.522	373825.17	-27.8	hart opnemer
vw3-2	2	44309.518	373825.174	-24.8	hart opnemer
vw3-3	2	44309.515	373825.179	-21.8	hart opnemer
vw4-1	2	44307.929	373825.272	-26.25	hart opnemer
vw4-2	2	44307.935	373825.265	-23.25	hart opnemer

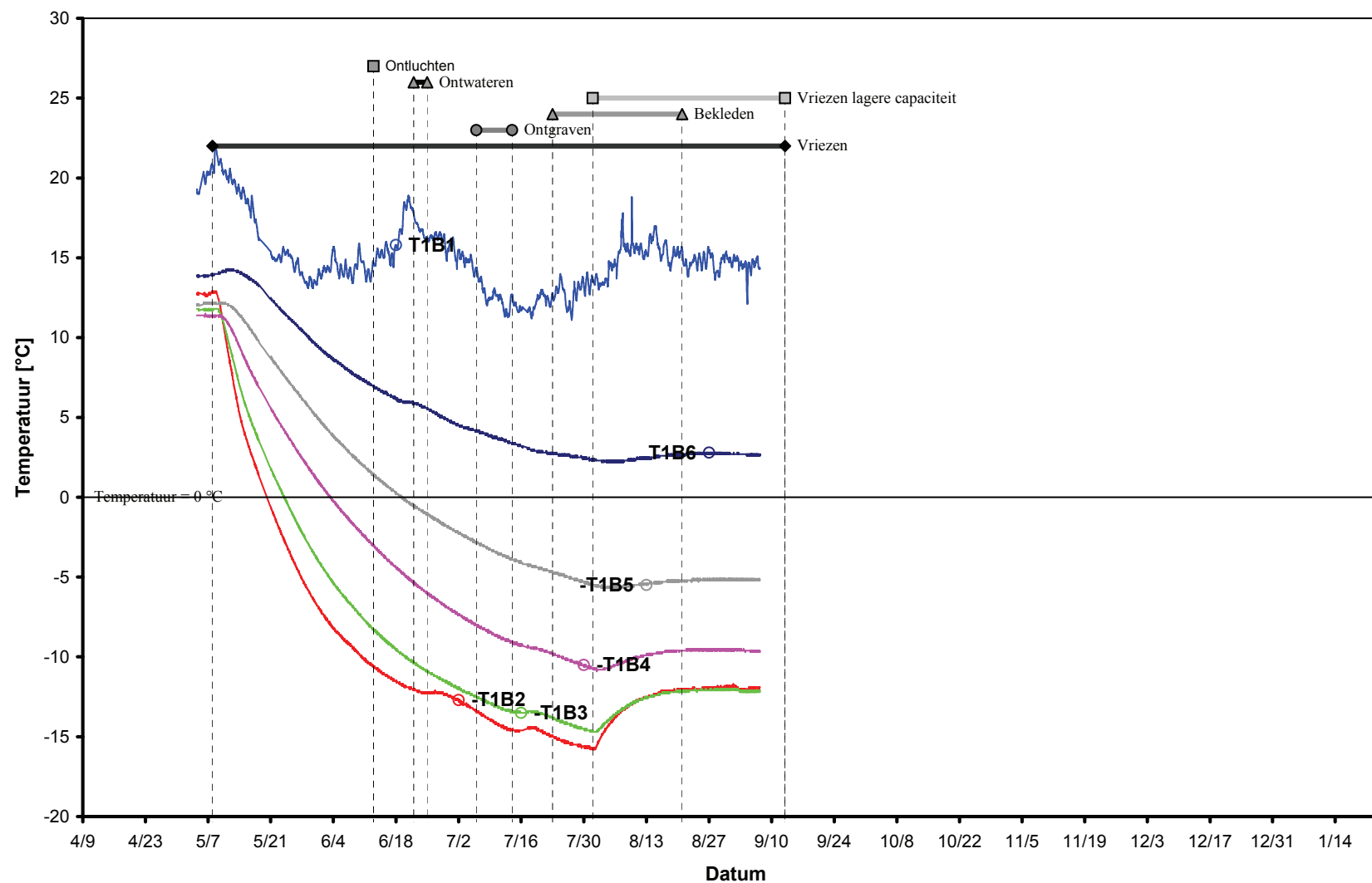
BIJLAGE E

TEMPERATUREN BIJ DV1

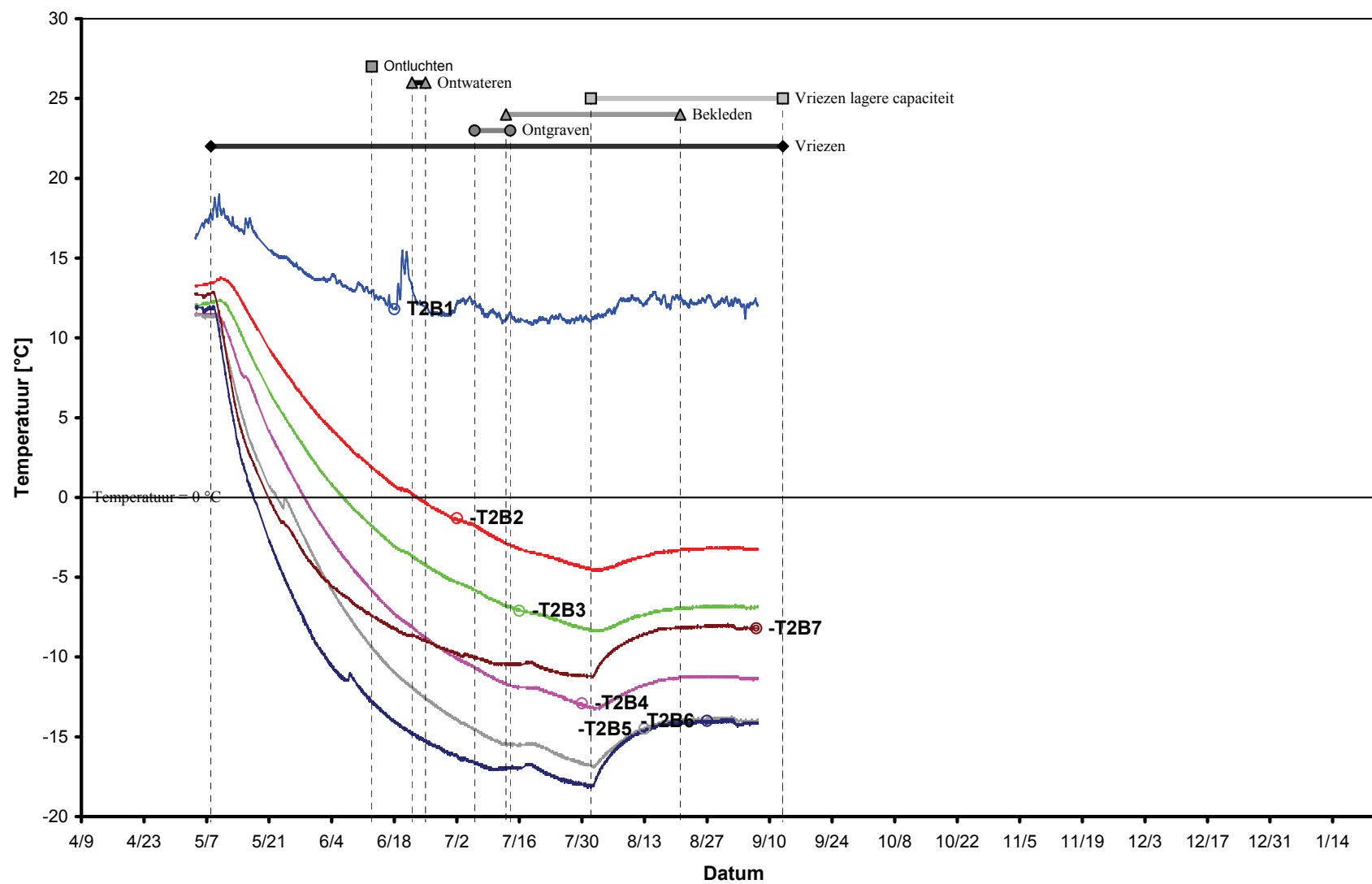
Vriesinstallatie DV1 » Temperaturen versus Datum



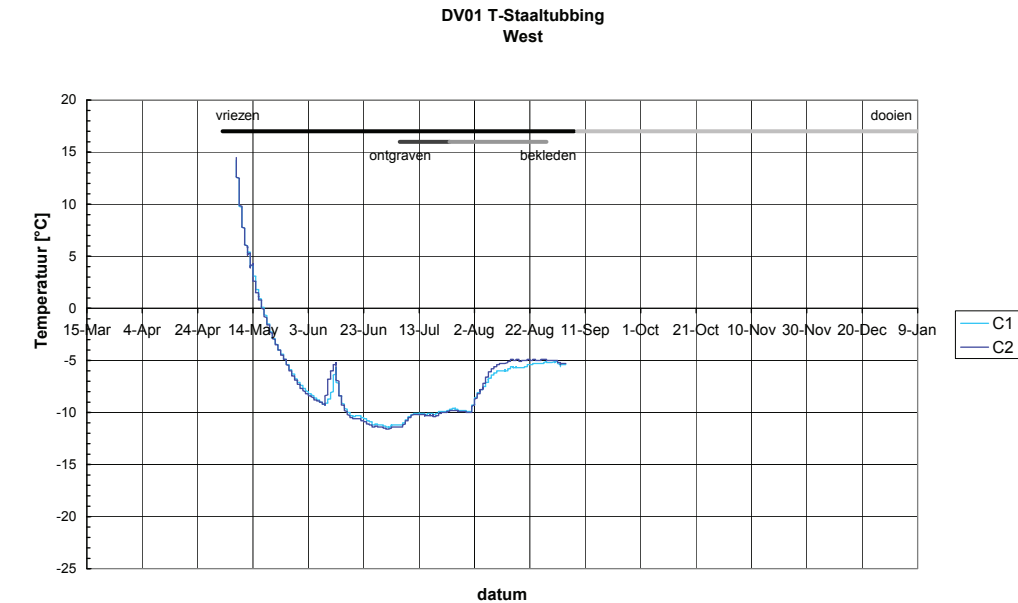
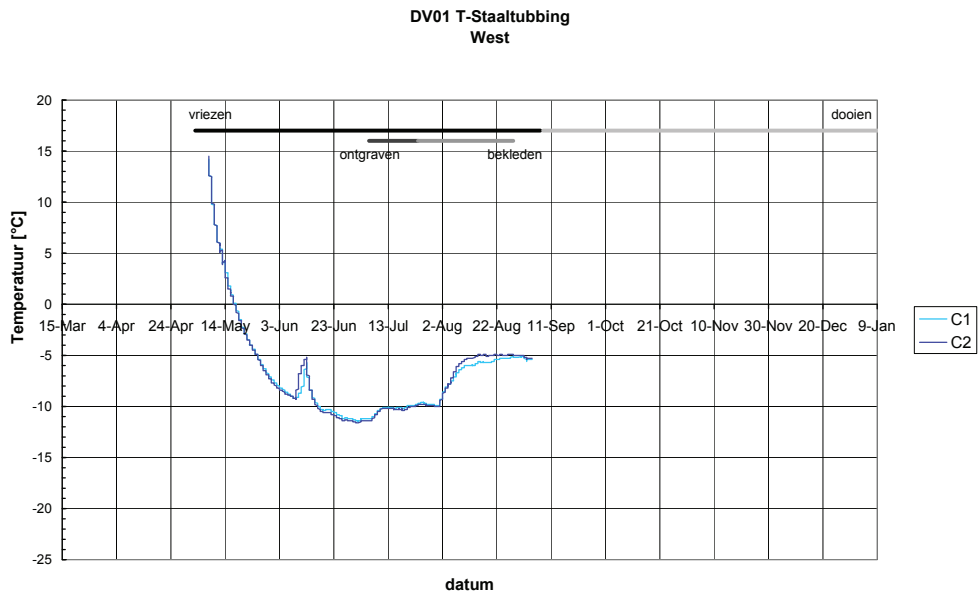
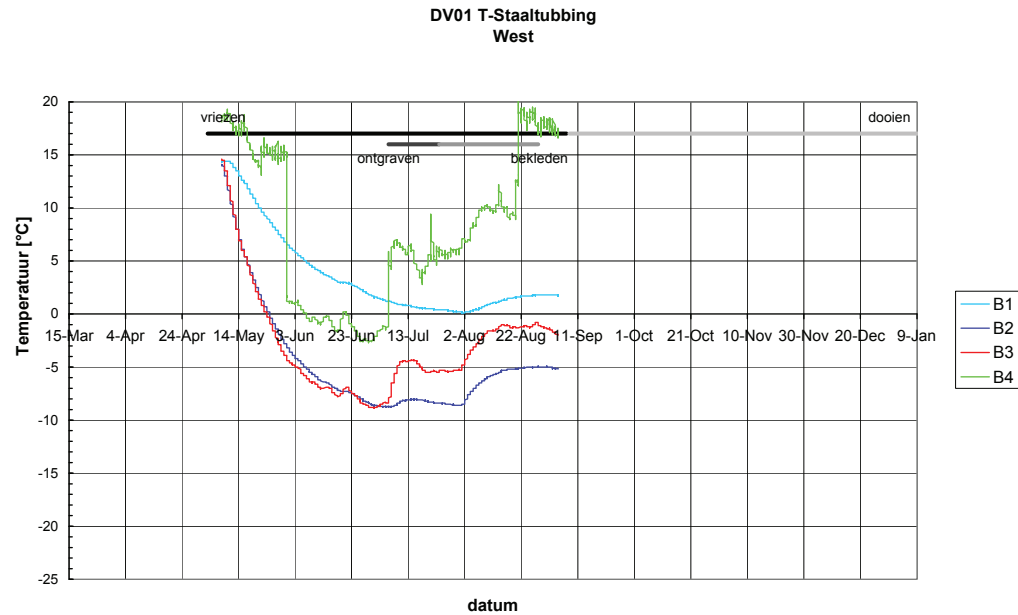
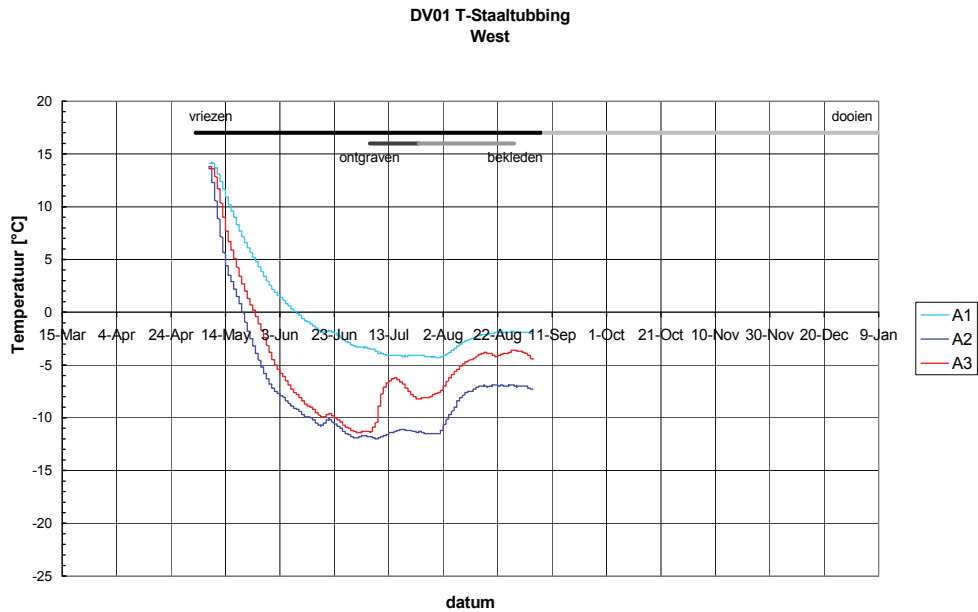
Temperatuurmeetlans 1 (T1B) DV1 » Temperaturen



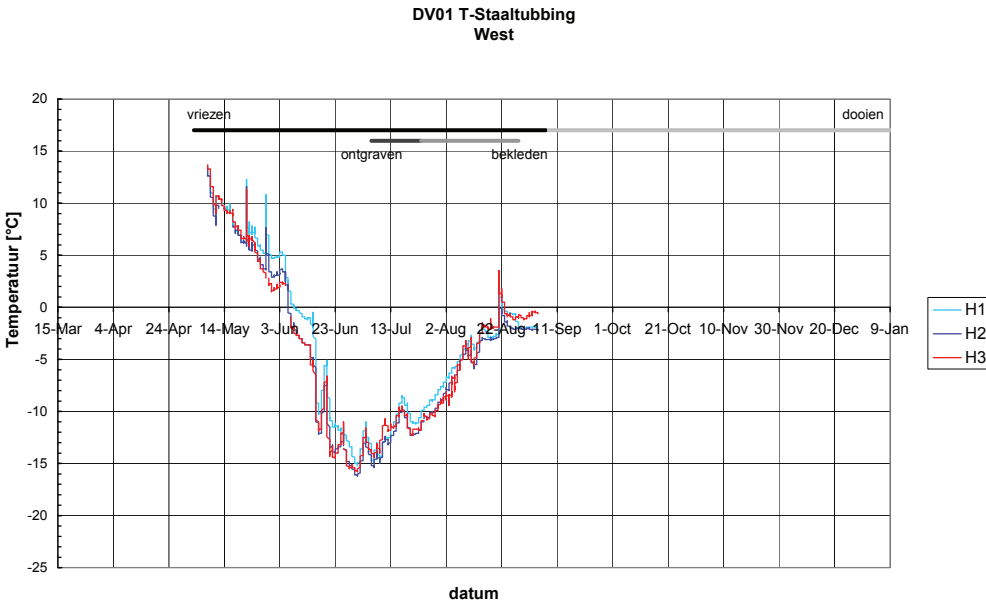
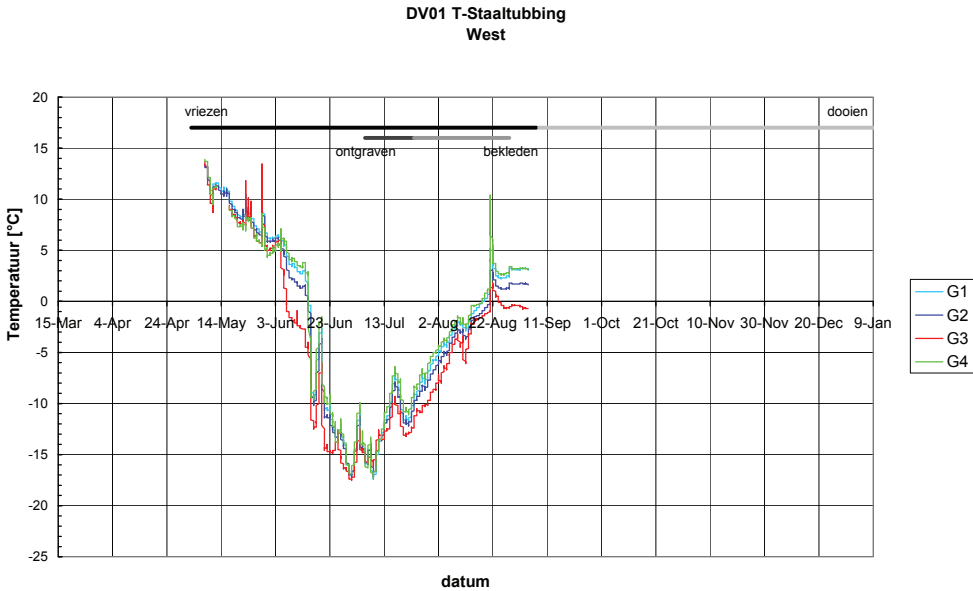
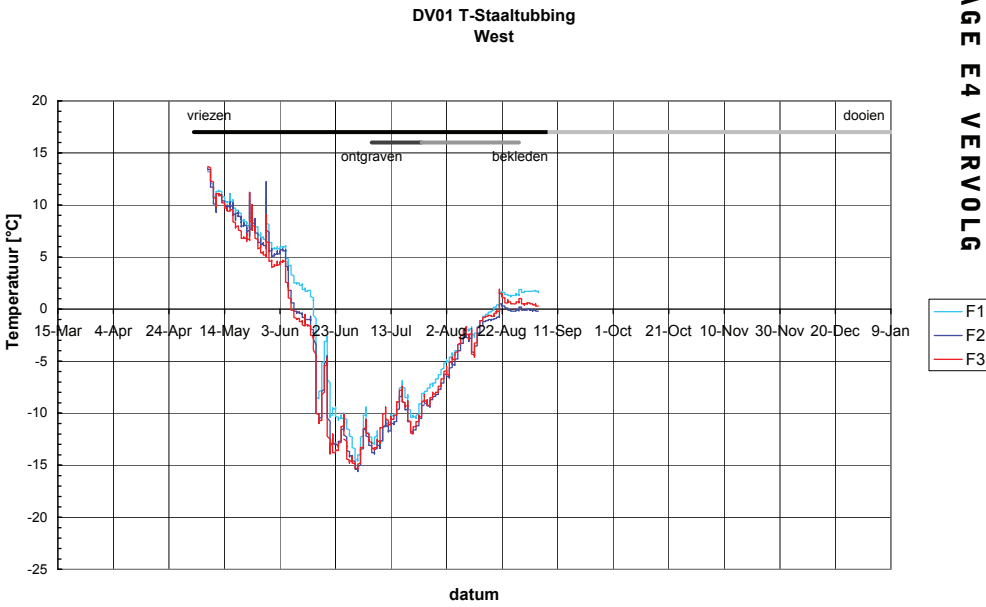
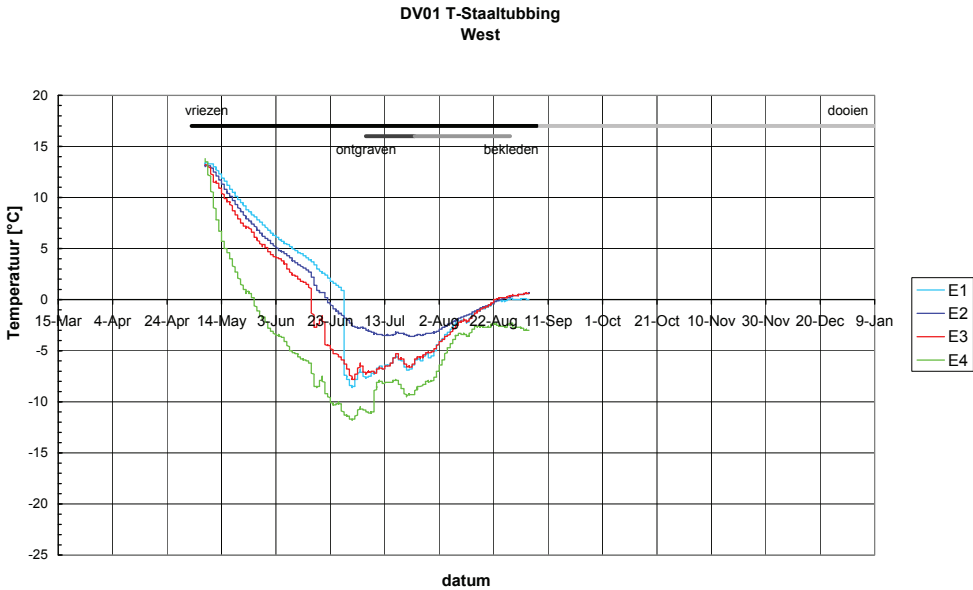
Temperatuurmeetlans (T2B) DV1 » Temperaturen versus Datum



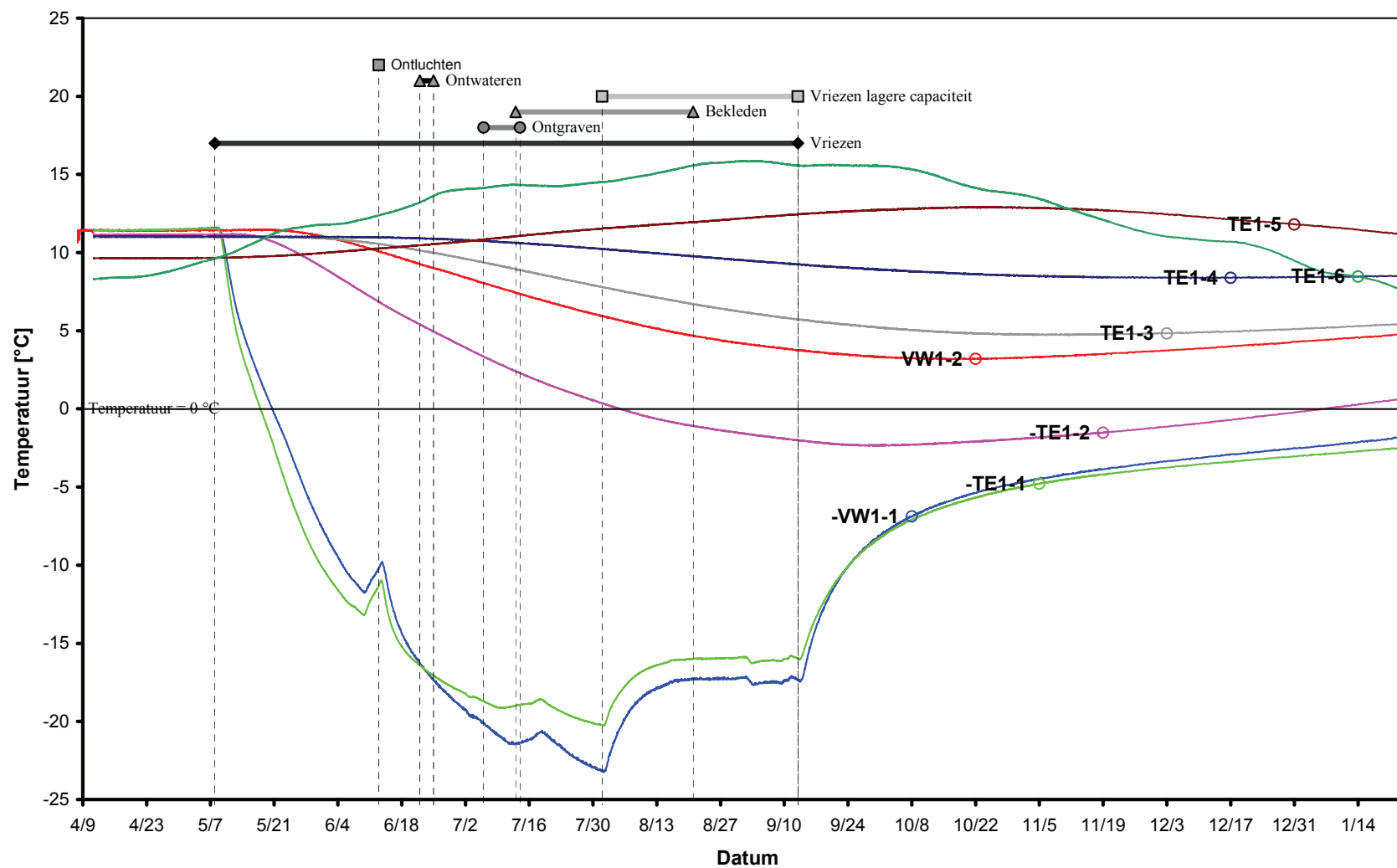
Temperaturen van de tunnelsegmenten van de westbuis bij DV1



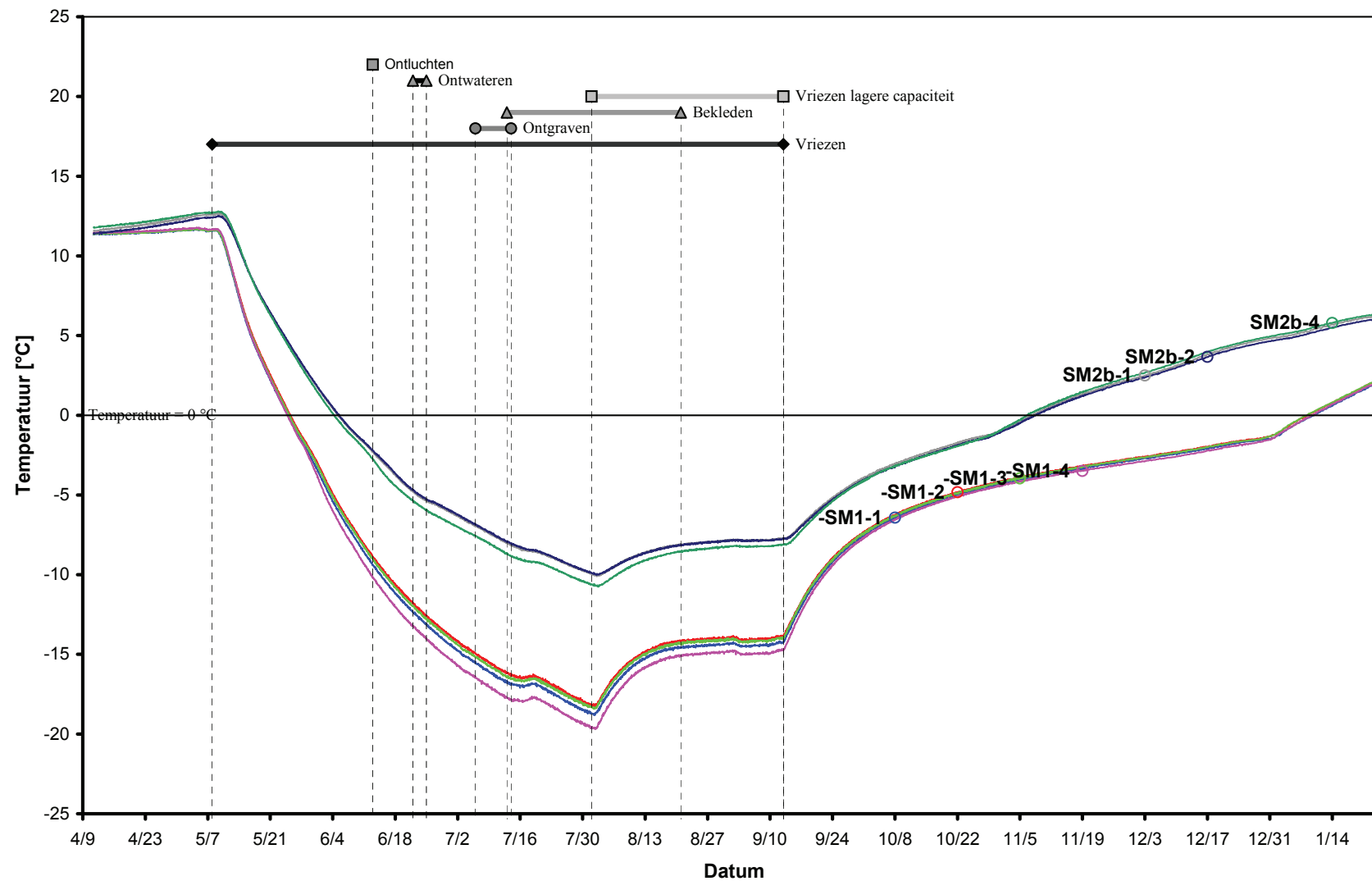
Temperaturen van de tunnelsegmenten van de westbuis bij DV1 (vervolg)



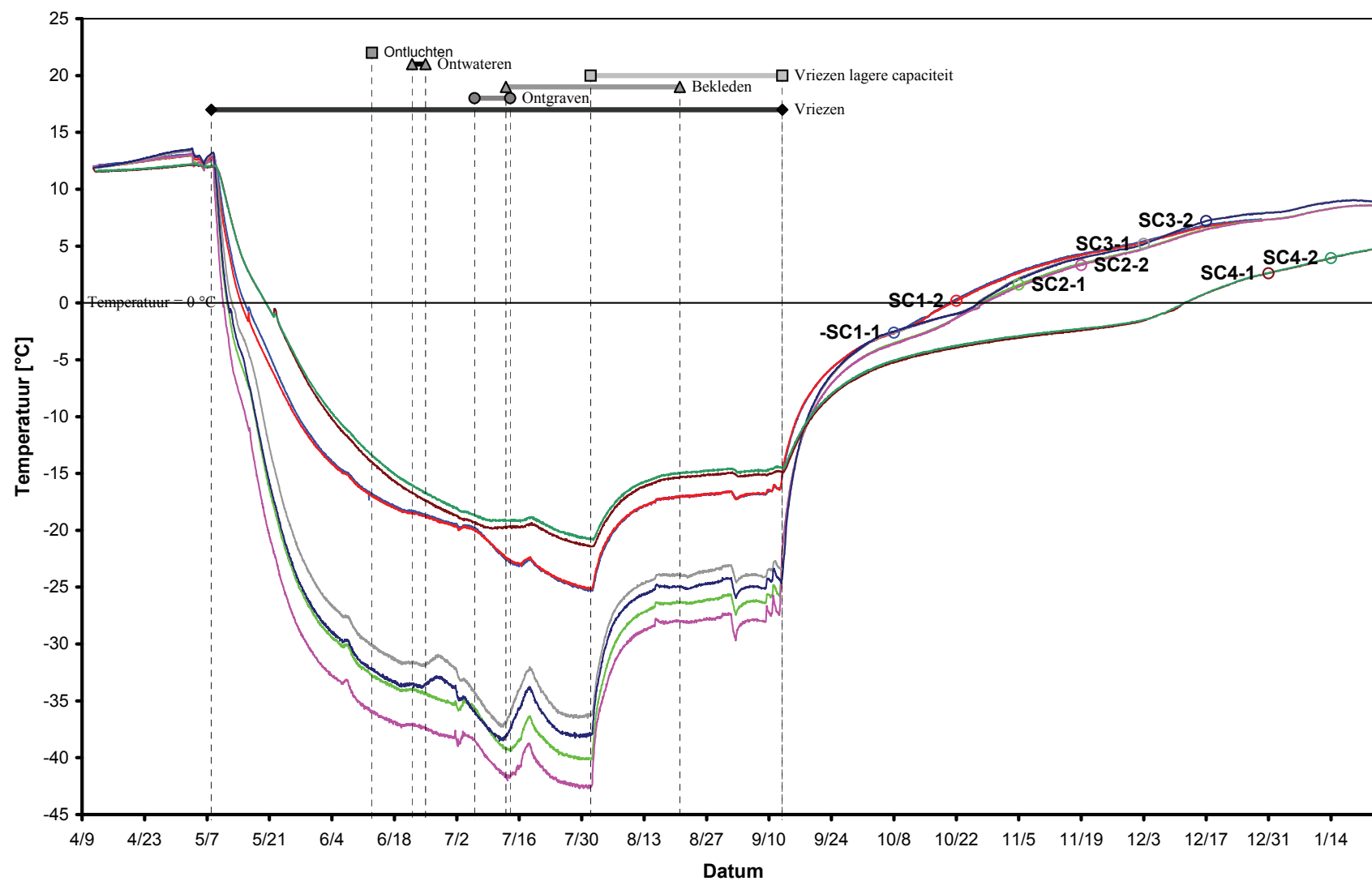
Vibrating wire waterspanningsmeters (VW1-1 en VW1-2) en thermosensoren 1 (TE1-1 tot TE1-6) » Temperaturen versus Datum



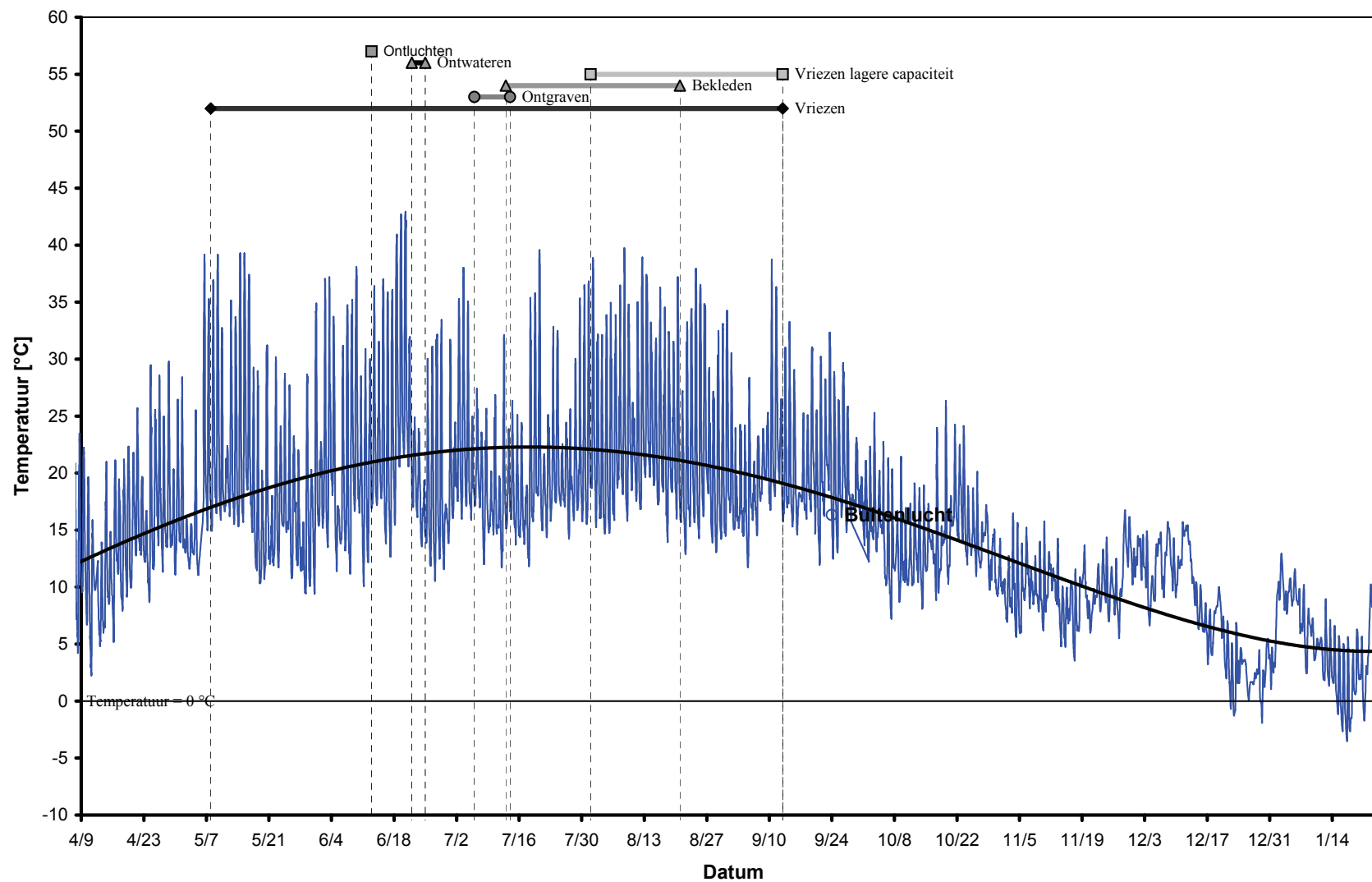
BRIEF AGE F6



Spade cellen (SC1, SC2, SC3 en SC4) » Temperaturen versus Datum



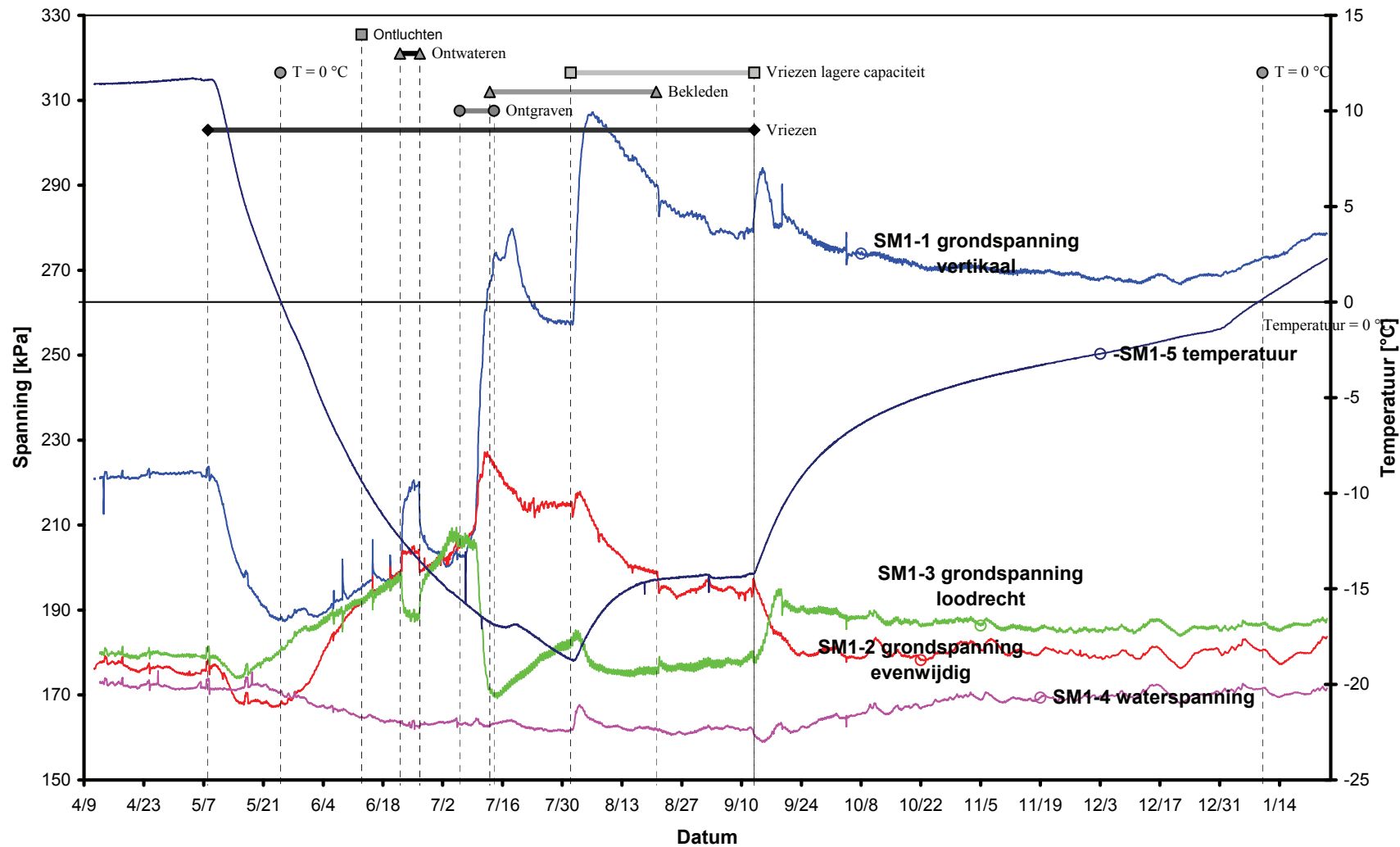
Data-acquisitiesysteem DV1 » Temperatuur versus Datum



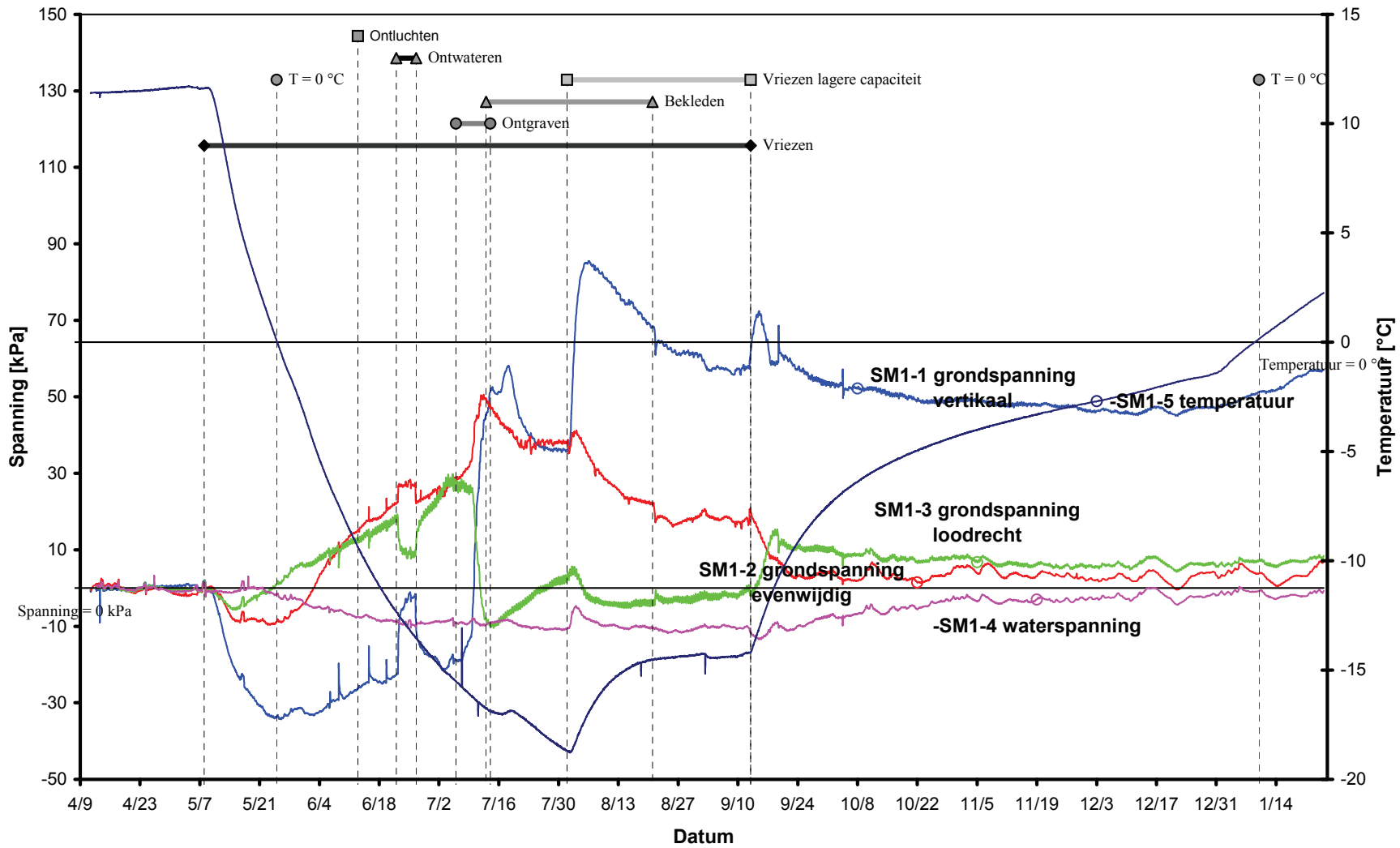
BIJLAGE F

SPANNINGEN SC, SM EN VW BIJ DV1

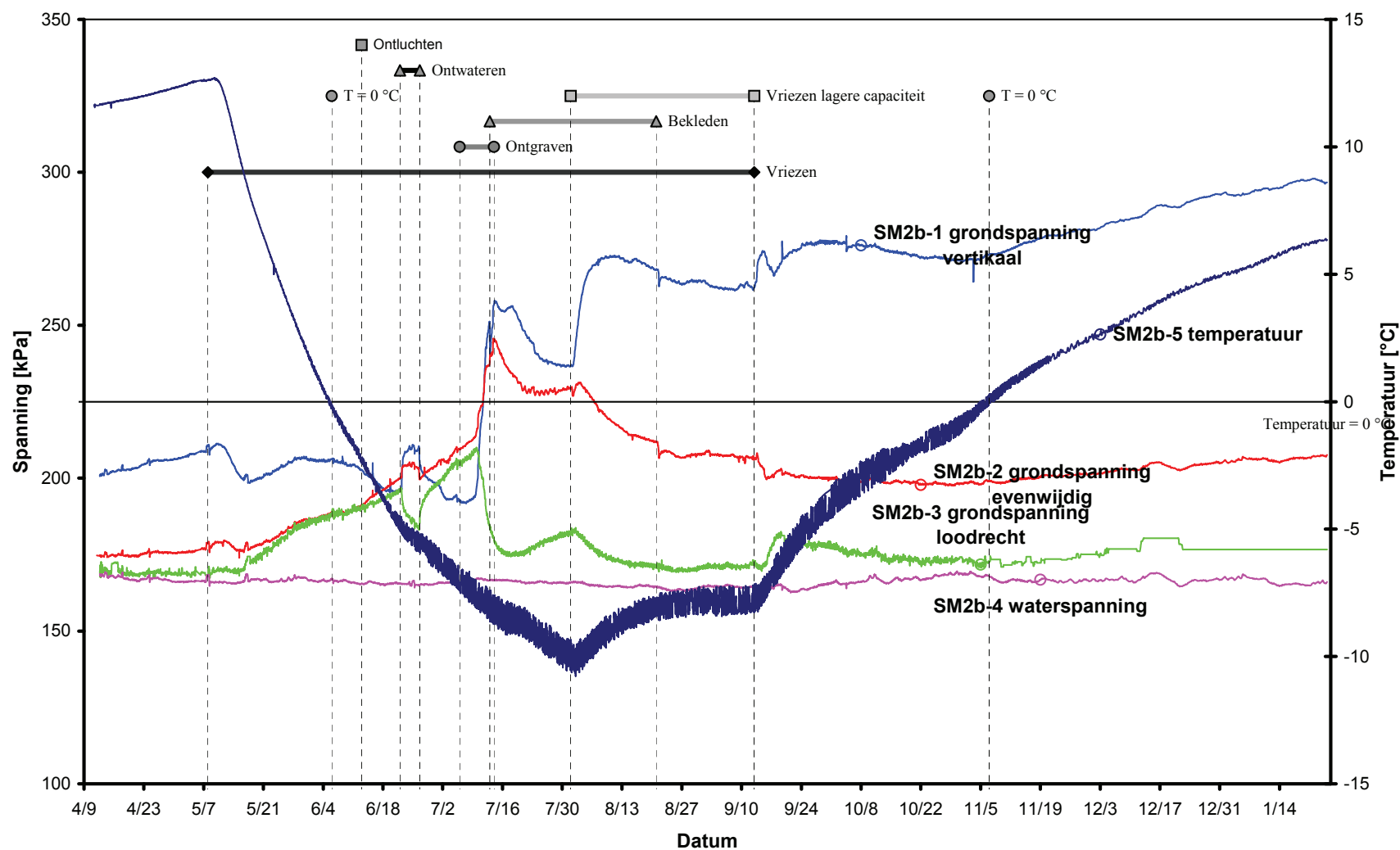
Stress monitoring station 1 (SM1) » Absolute grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum



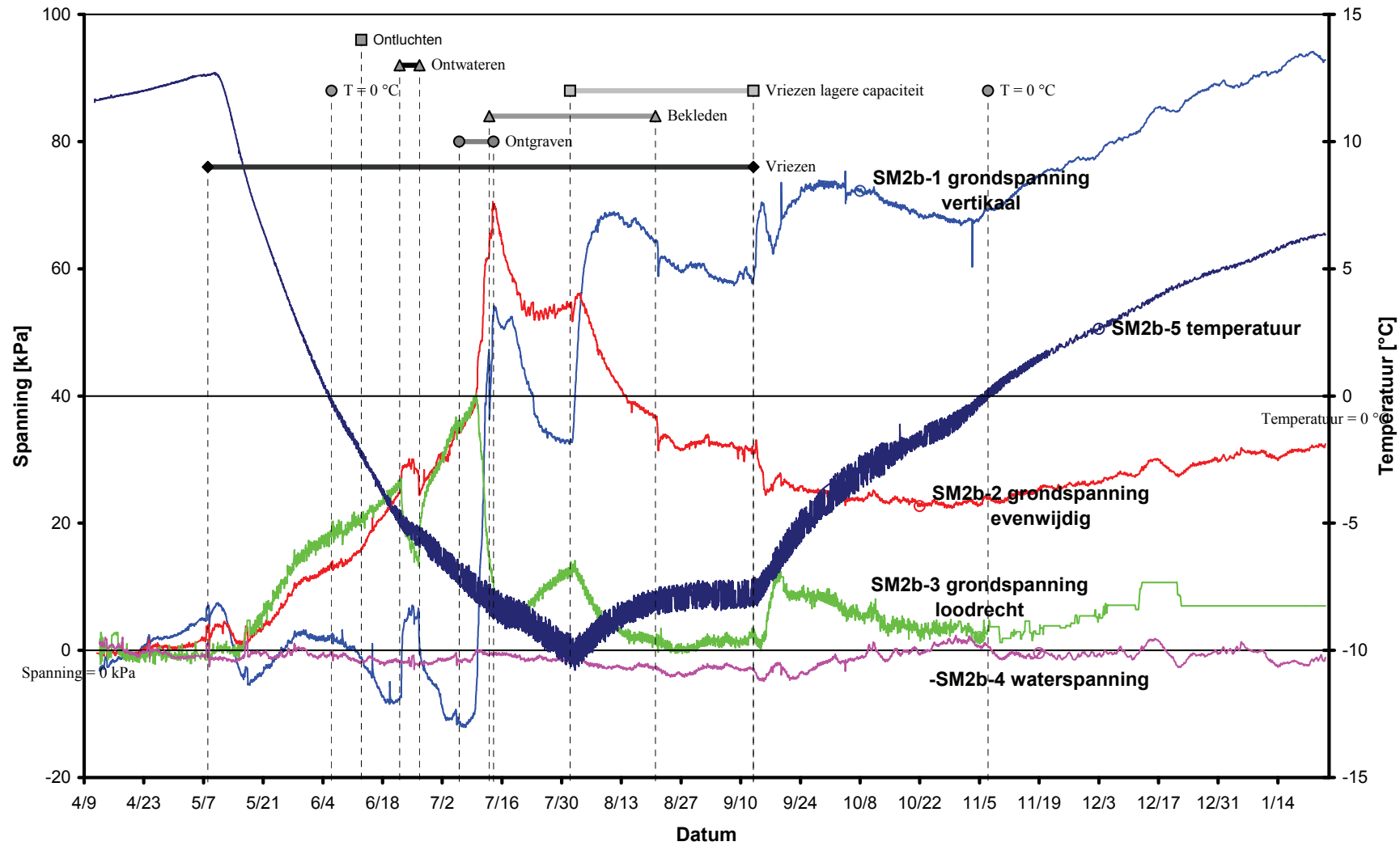
Stress monitoring station 1 (SM1) » Relatieve grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum



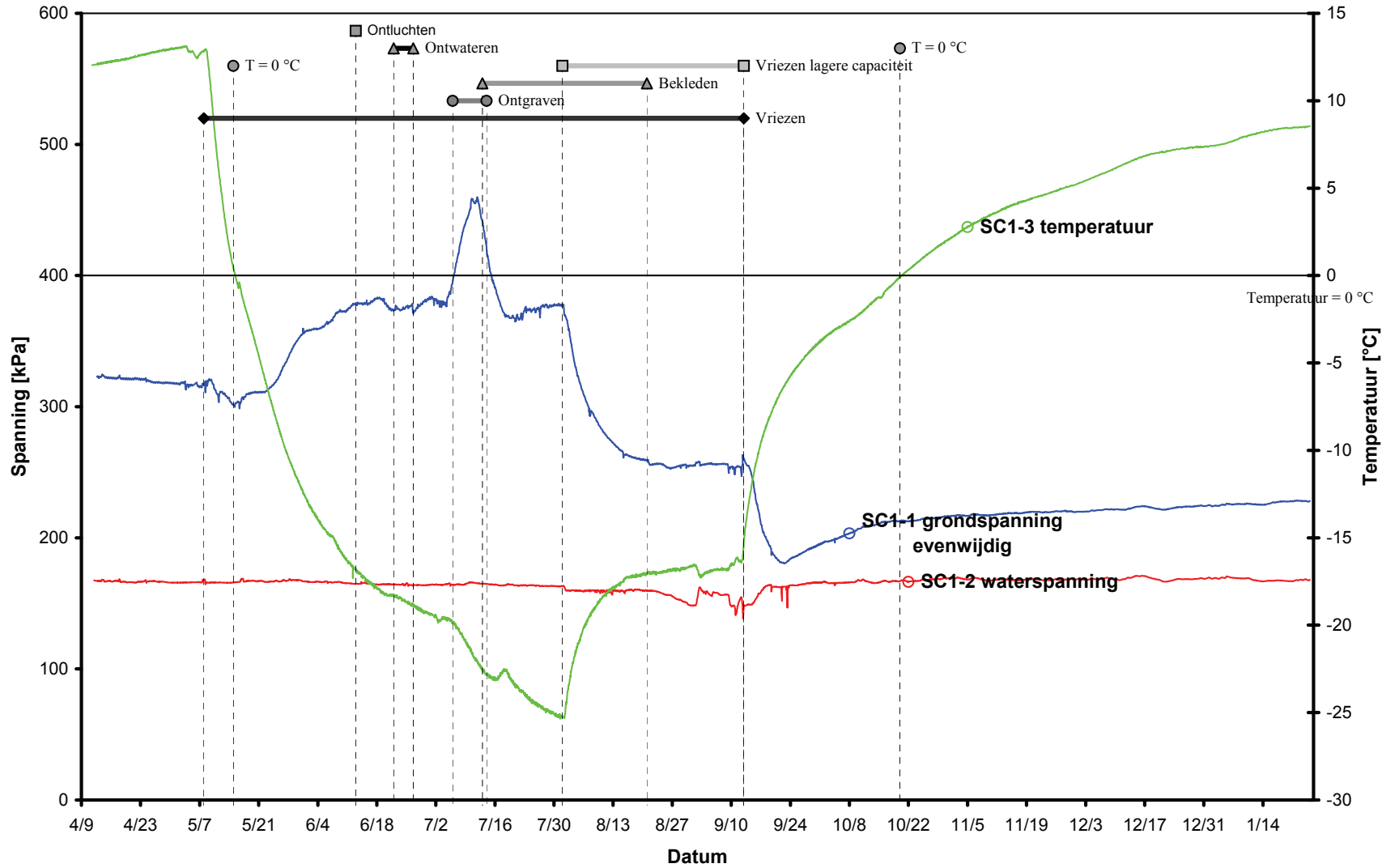
Stress monitoring station 2b (SM2b) » Absolute grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum



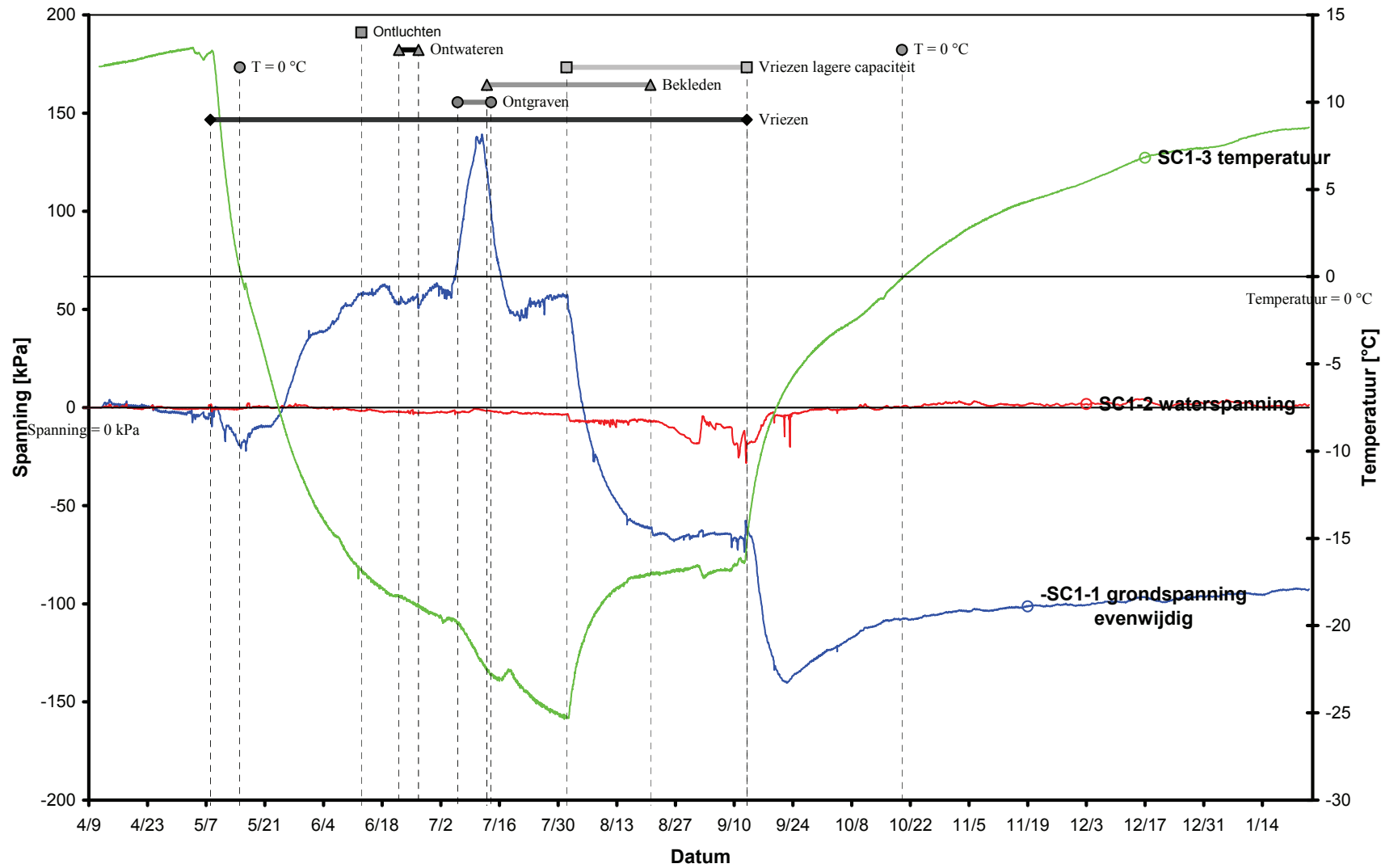
Stress monitoring station 2b (SM2b) » Relatieve grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum



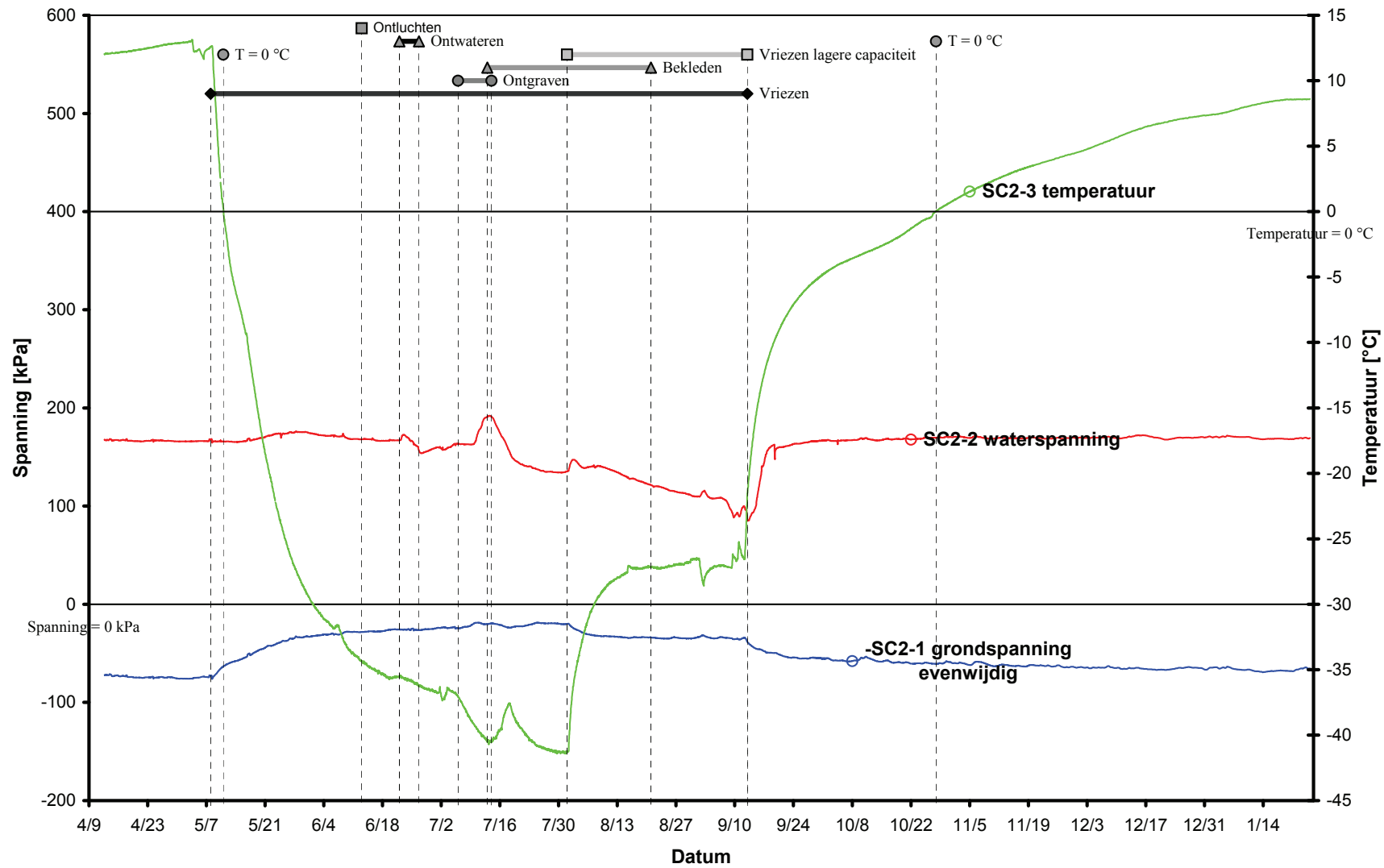
Spade cel 1 (SC1) » Absolute grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum



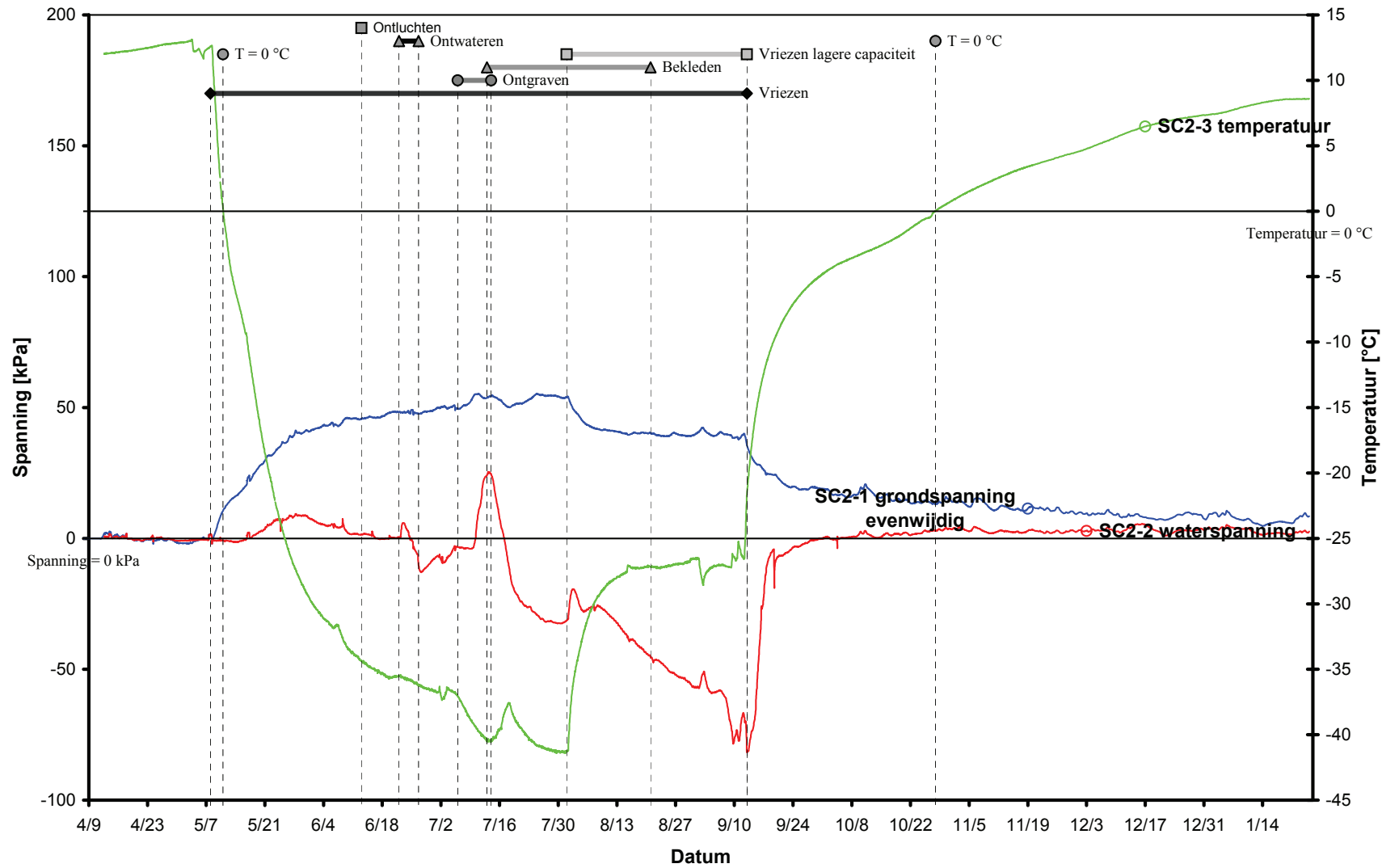
Spade cel 1 (SC1) » Relatieve grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum



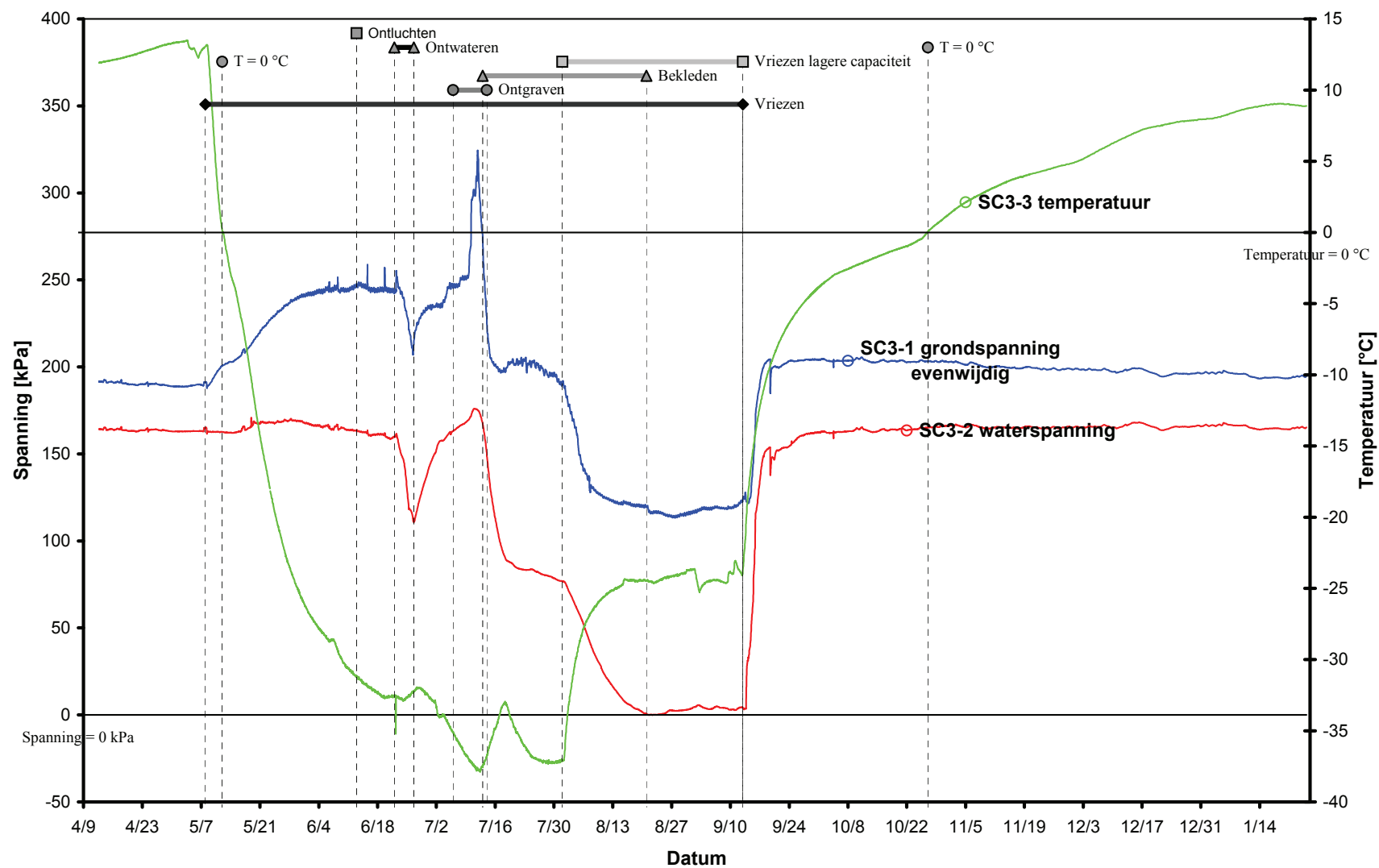
Spade cel 2 (SC2) » Absolute grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum



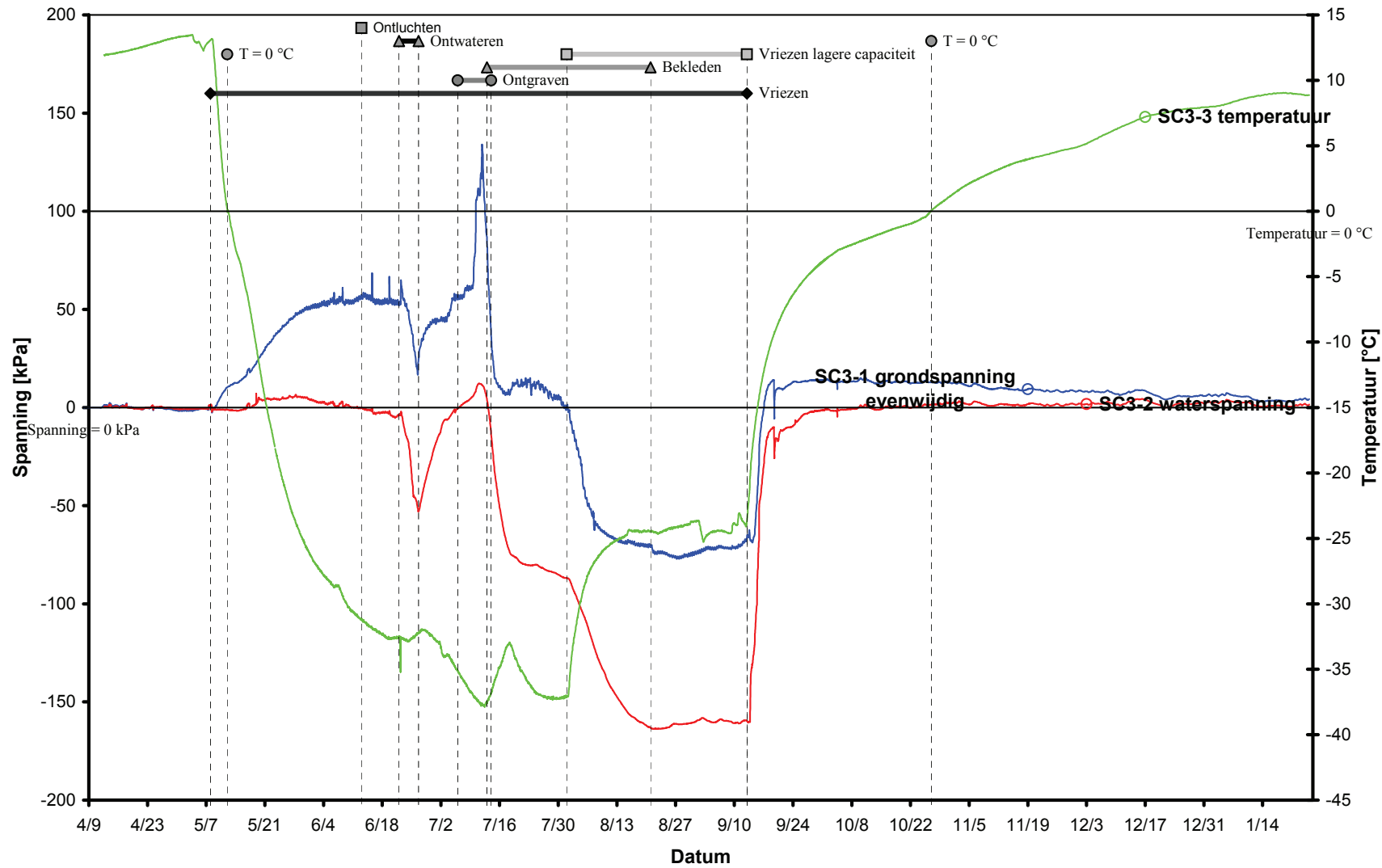
Spade cel 2 (SC2) » Relatieve grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum



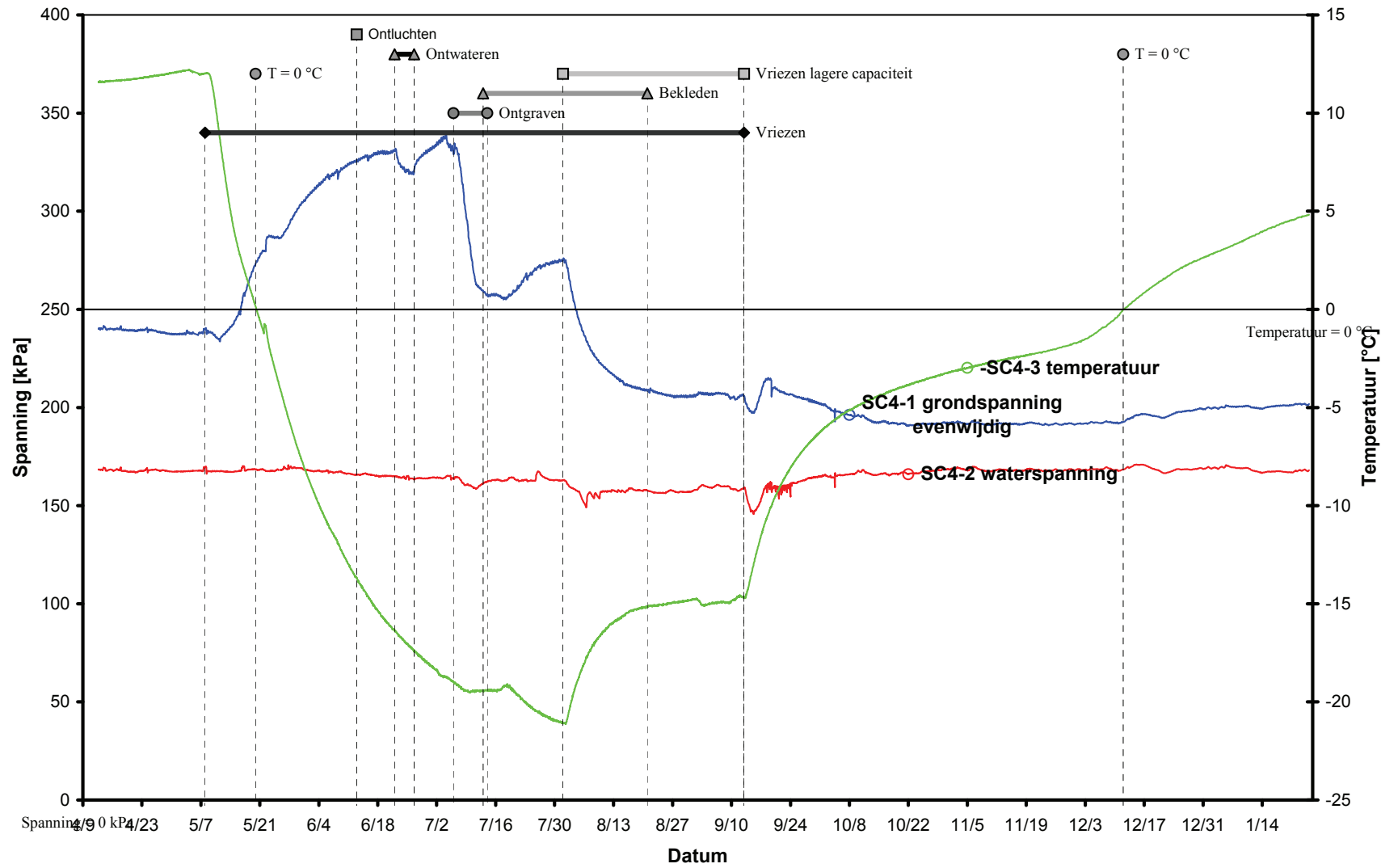
Spade cel 3 (SC3) » Absolute grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum



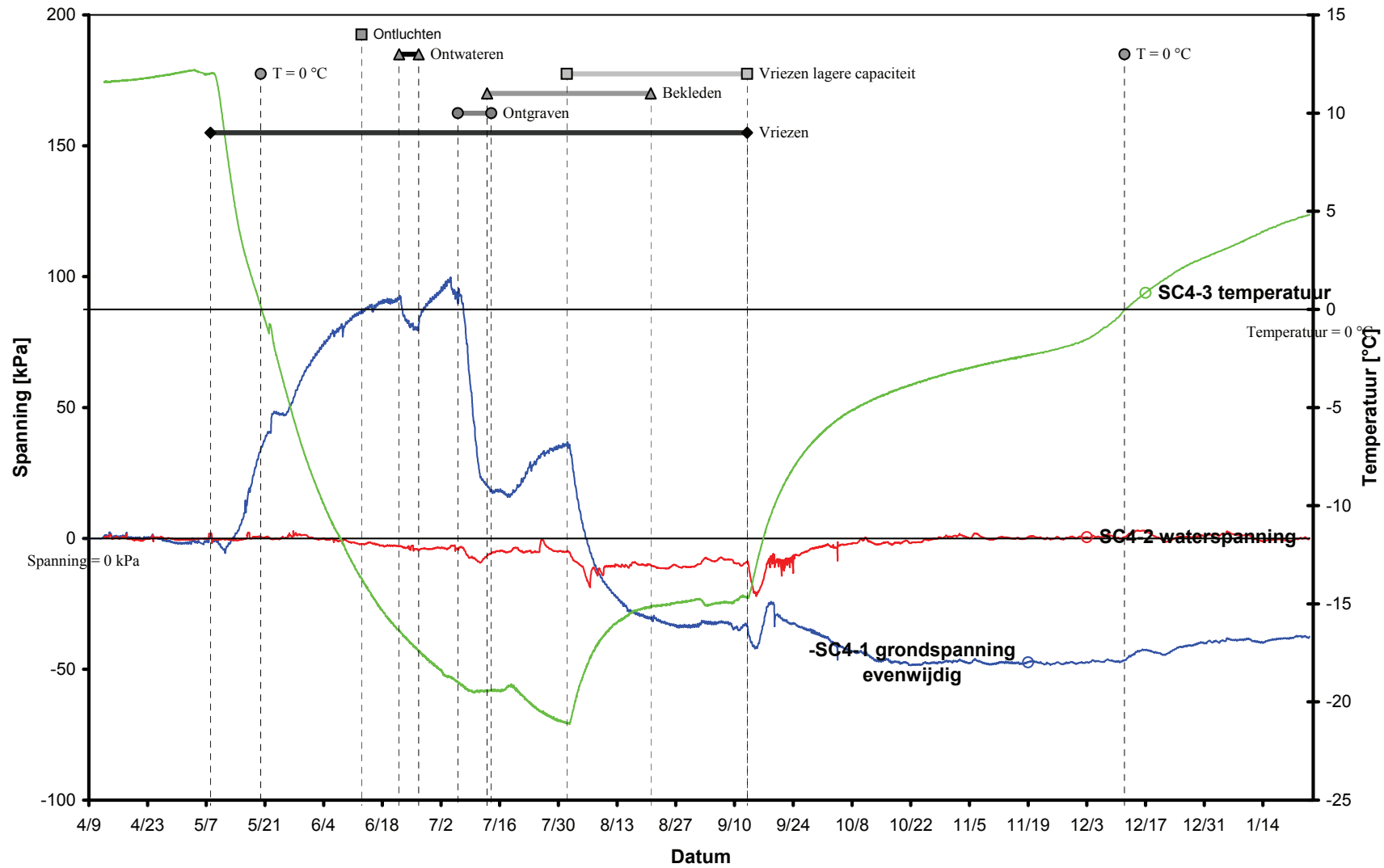
Spade cel 3 (SC3) » Relatieve grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum



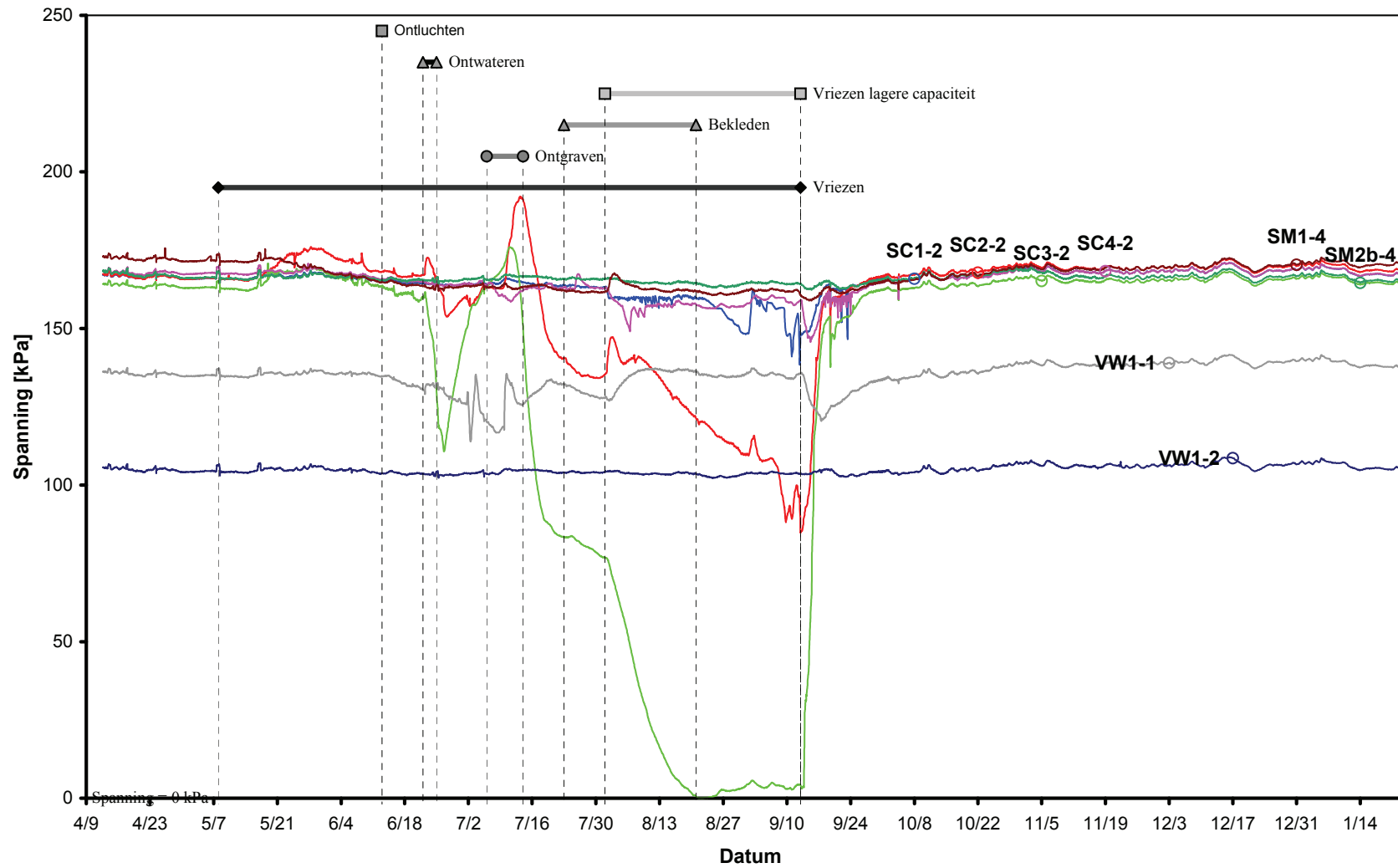
Spade cel 4 (SC4) » Absolute grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum



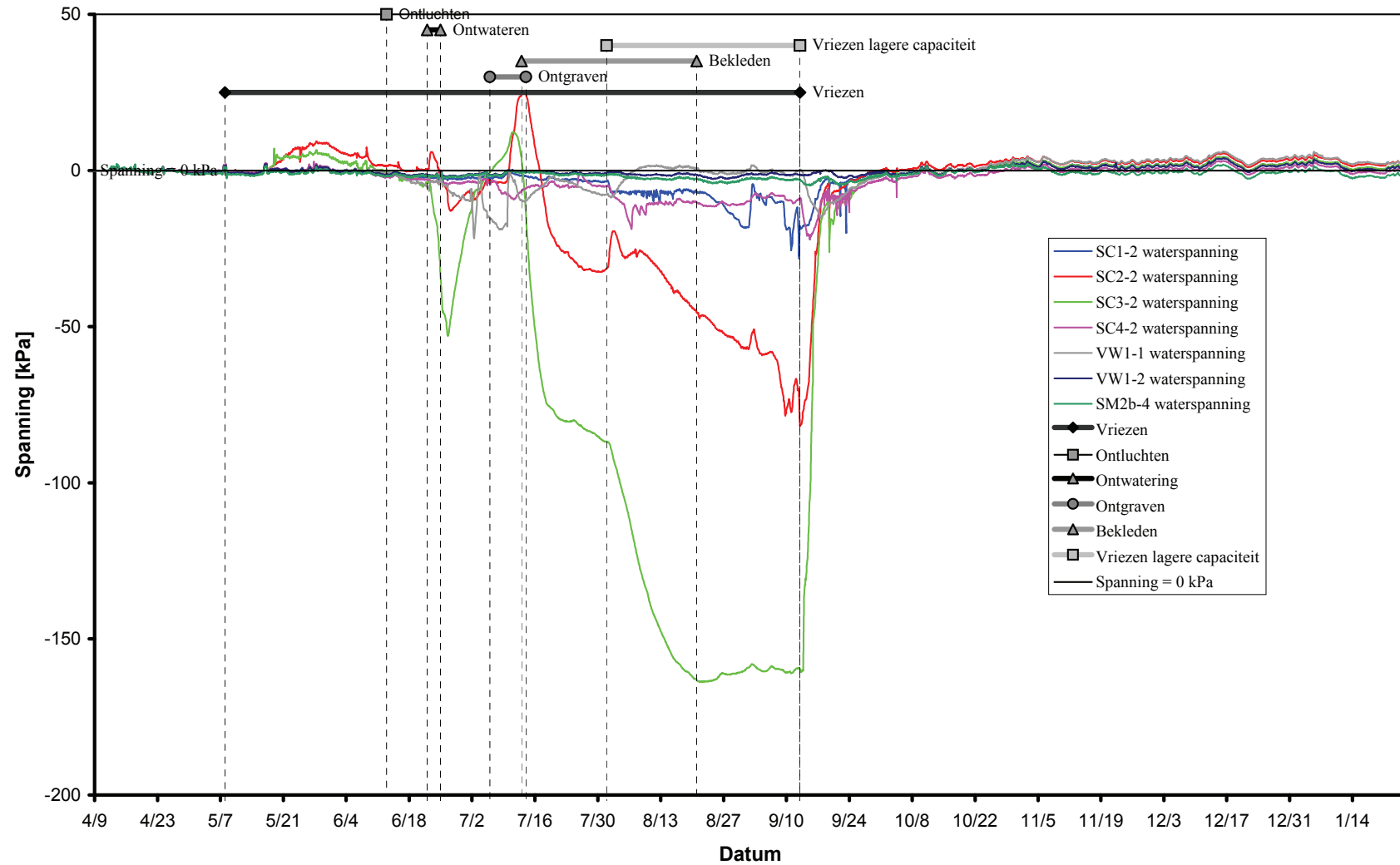
Spade cel 4 (SC4) » Relatieve grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum



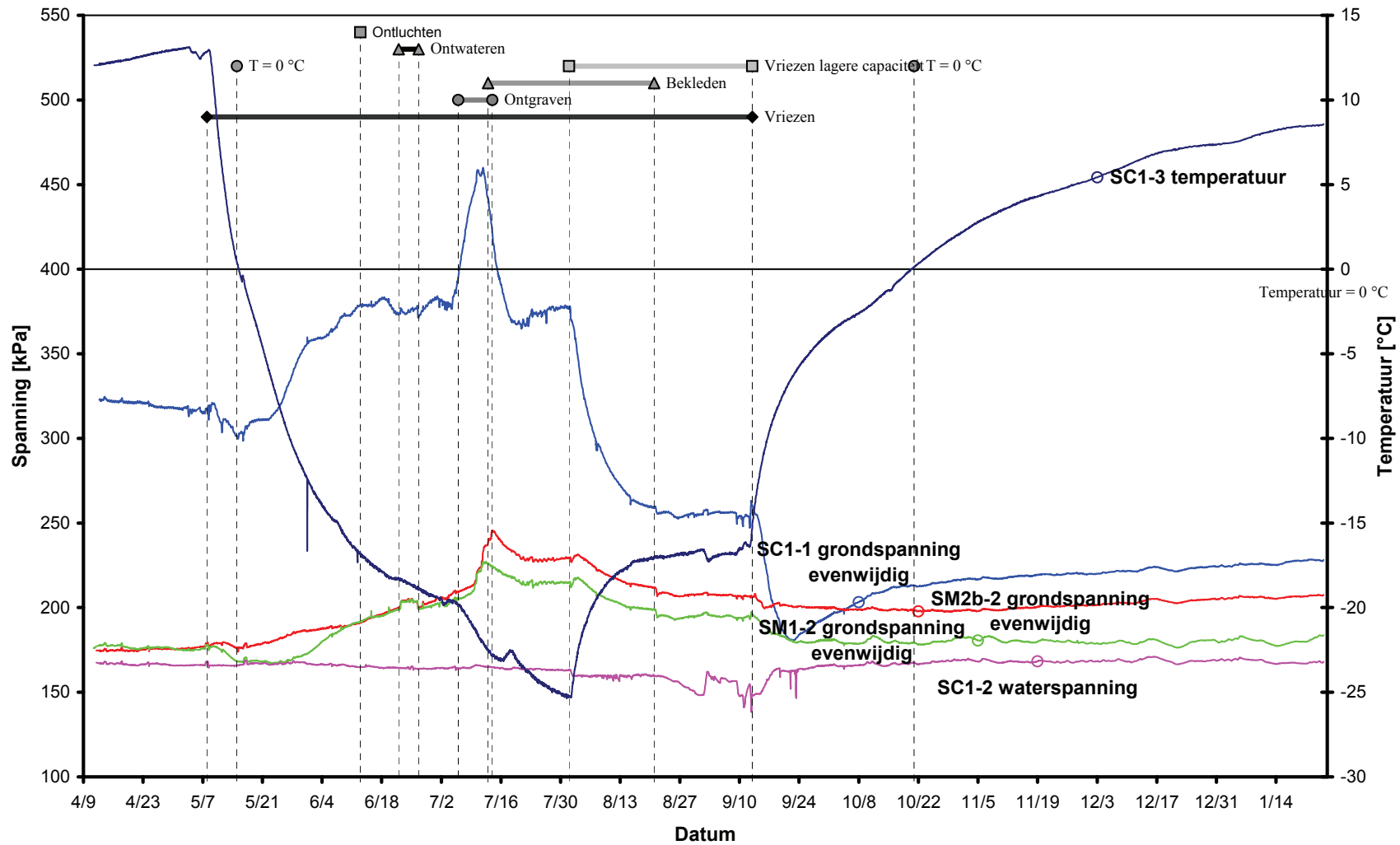
Spade cellen (SC1-SC4), stress monitoring stations (SM1en SM2b), vibrating wire
waterspanningsmeters (VW1-1 en VW1-2) » Absolute waterspanningen versus Datum



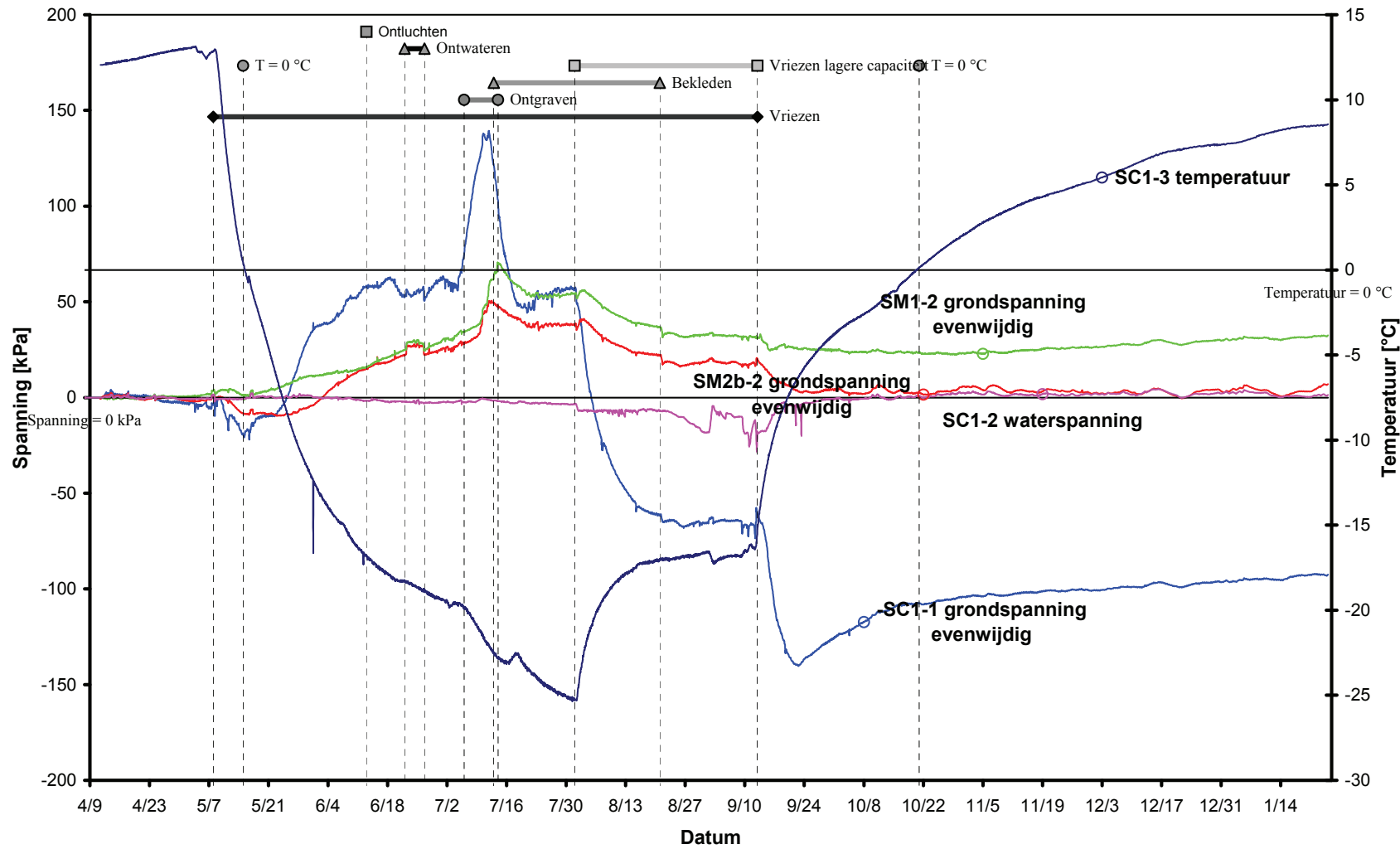
Spade cellen (SC1-SC4), stress monitoring stations (SM1en SM2b), vibrating wire waterspanningsmeters (VW1-1 en VW1-2) » Relatieve waterspanningen versus Datum



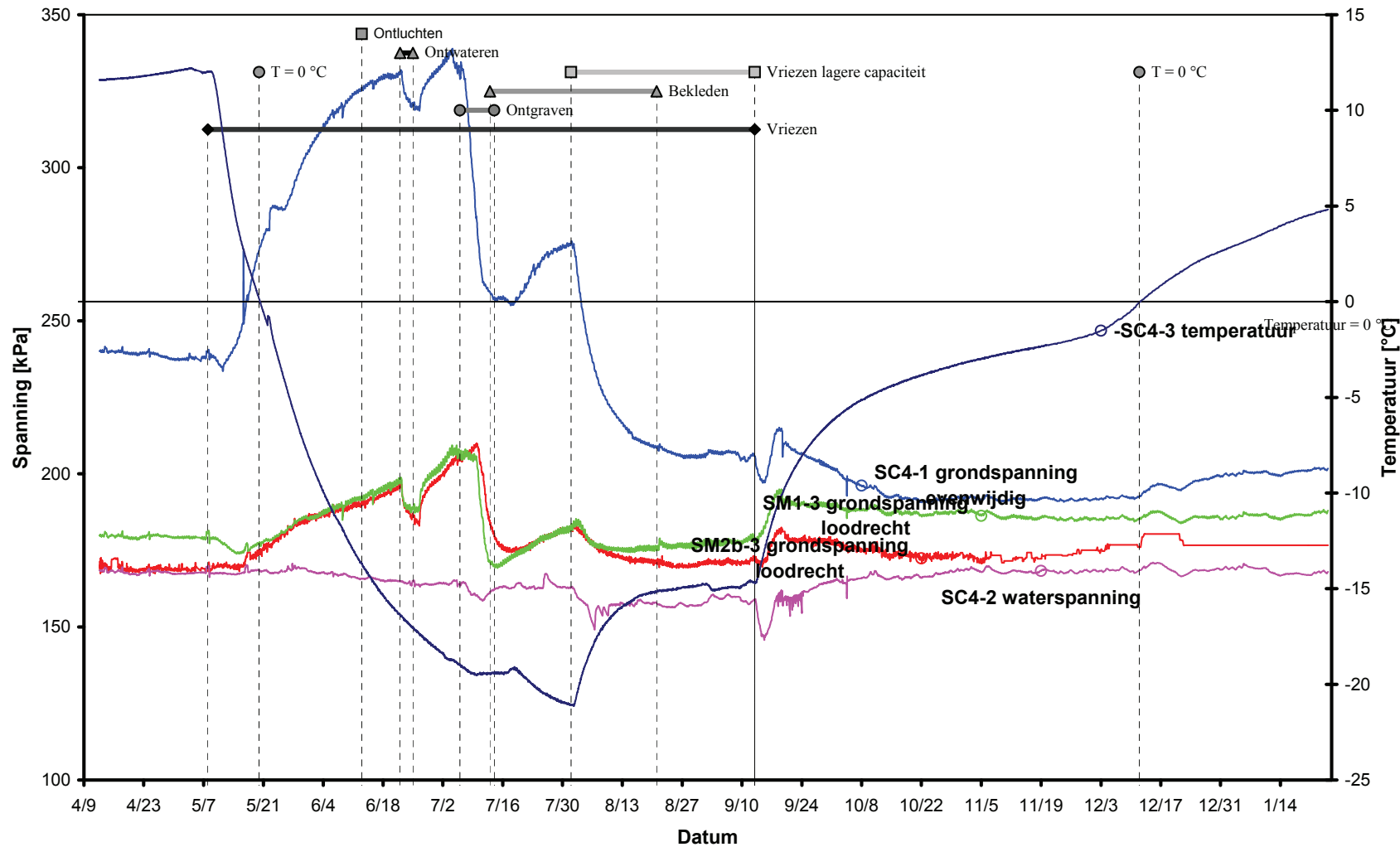
Vergelijk Stress monitoring station 1 en 2b (SM1-2 en SM2b-2) en spade cel 1 (SC1) » Absolute grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum



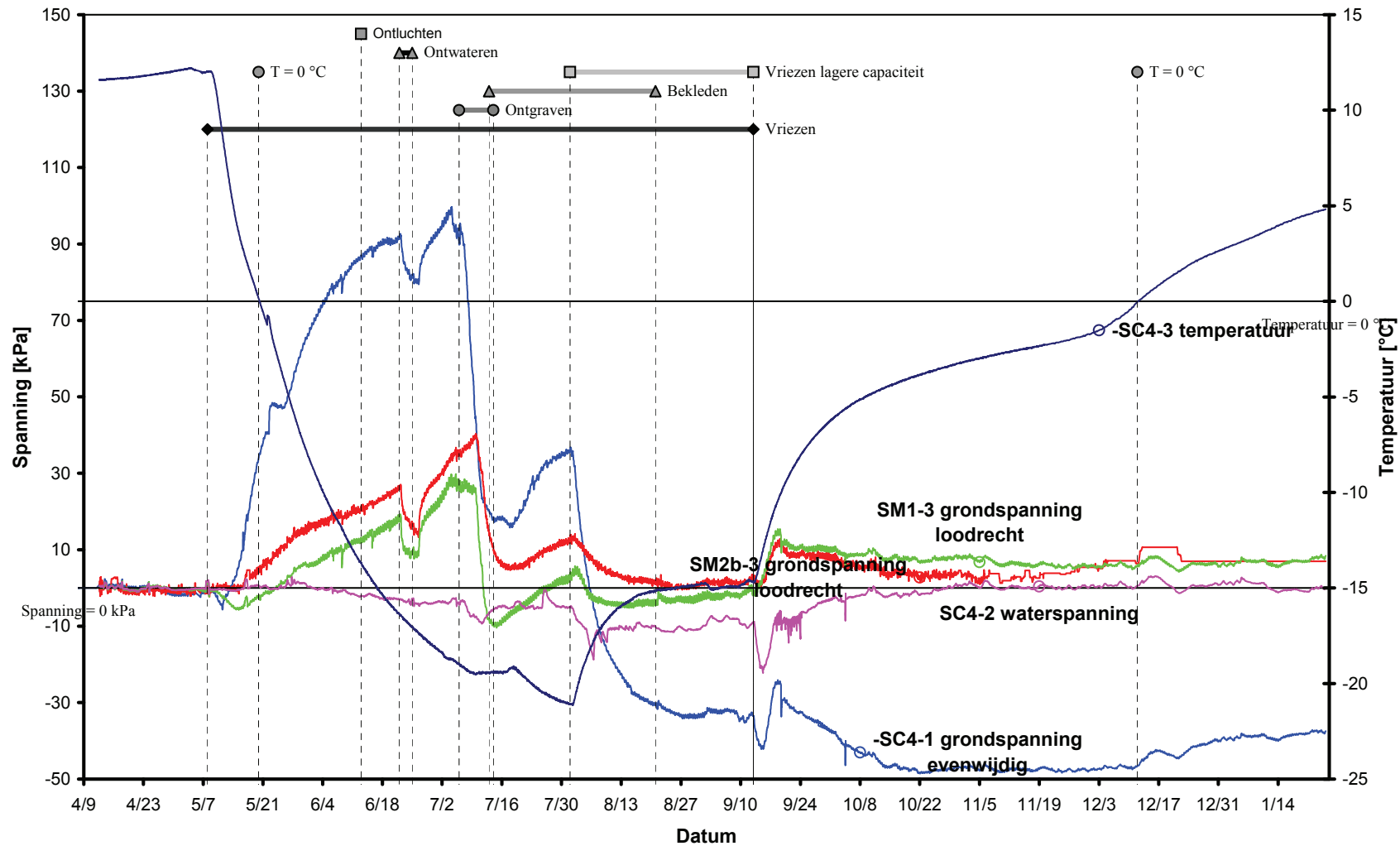
Vergelijk Stress monitoring station 1 en 2b (SM1-2 en SM2b-2) en spade cel 1 (SC1) » Relatieve grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum



Vergelijk Stress monitoring station 1 en 2b (SM1-3 en SM2b-3) en spade cel 4 (SC4) » Absolute grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum



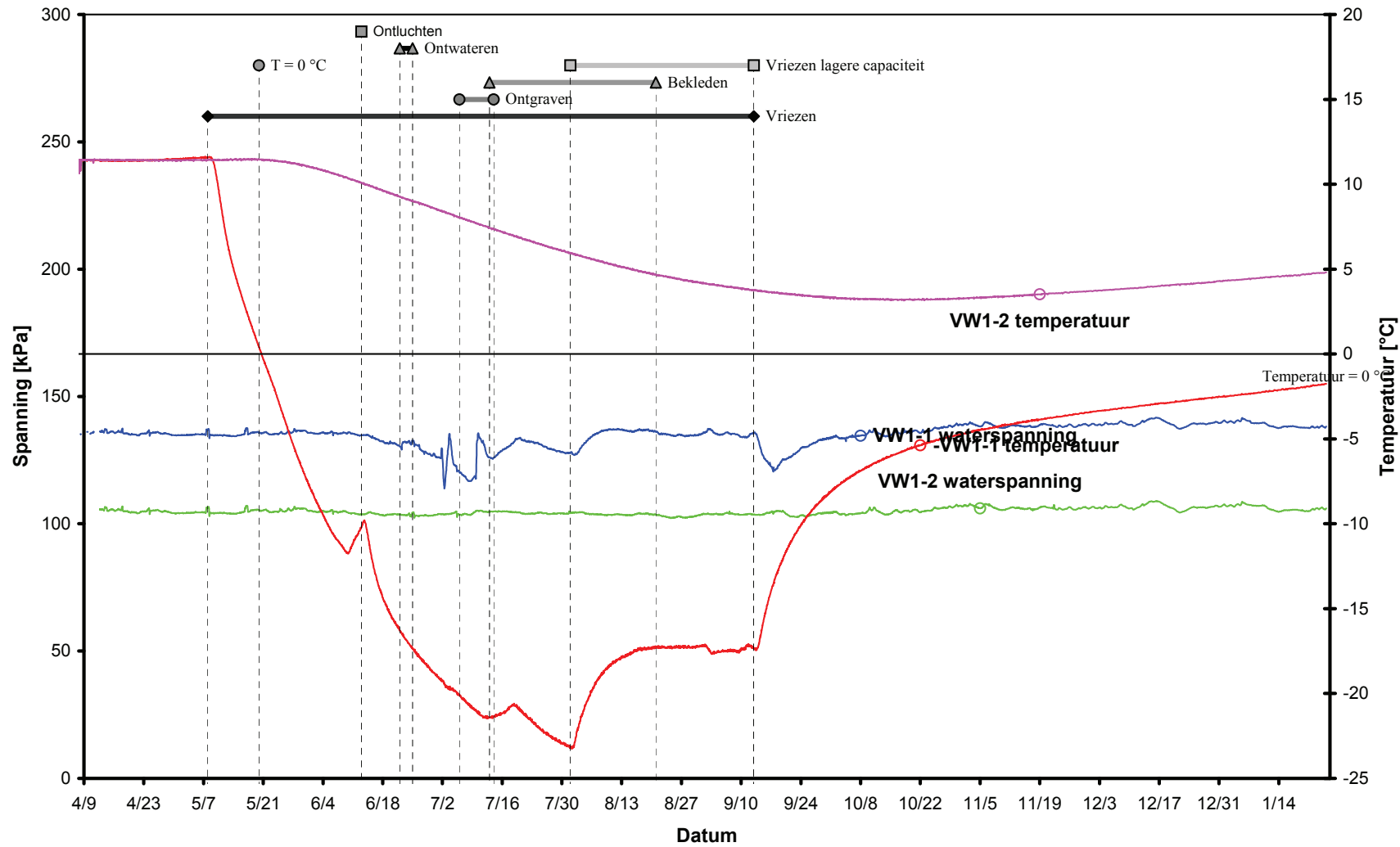
Vergelijk Stress monitoring station 1 en 2b (SM1-3 en SM2b-3) en spade cel 4 (SC4) » Relatieve grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum



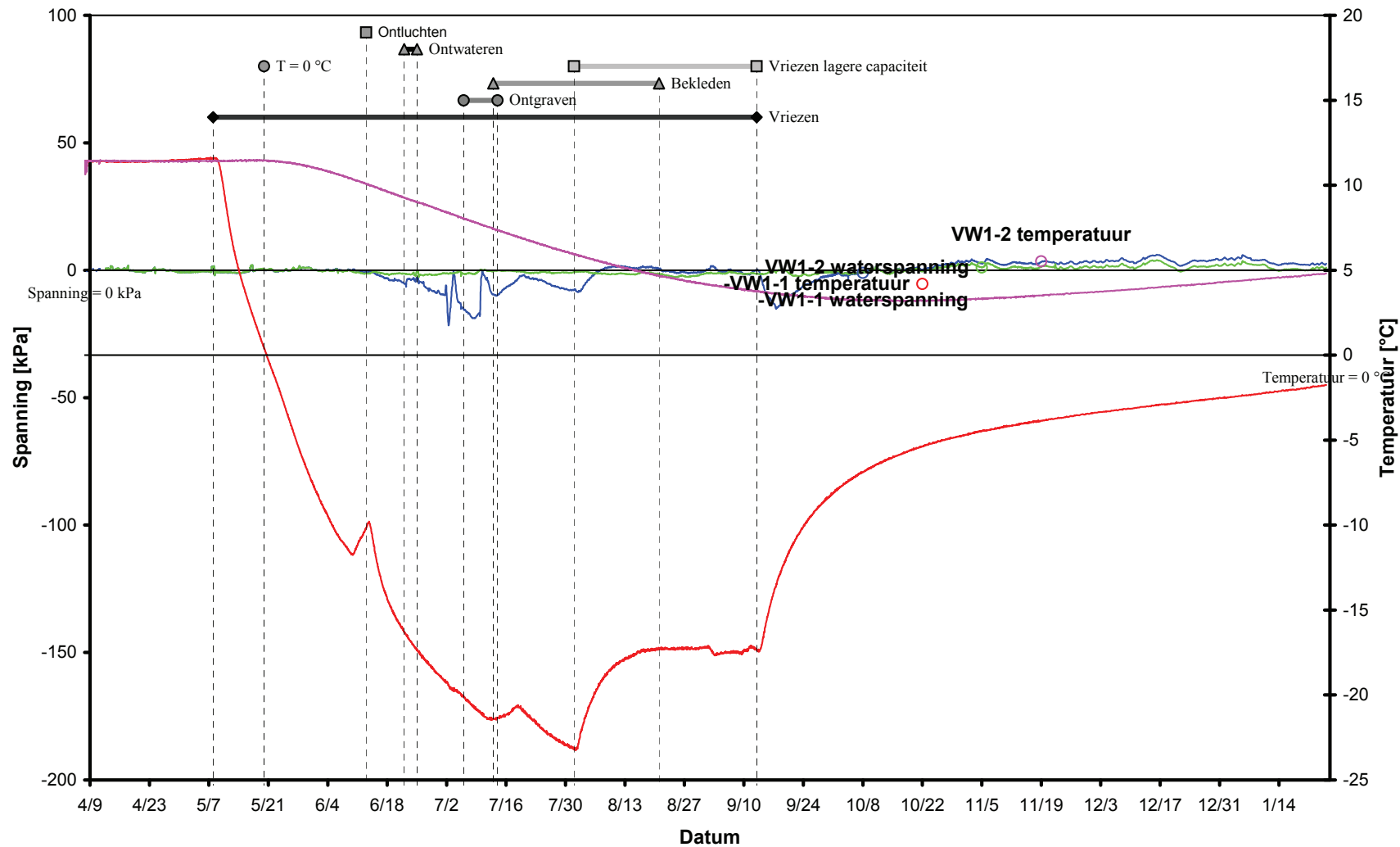
BIJLAGE G

WATERSPANNINGEN VW EN HART DV1

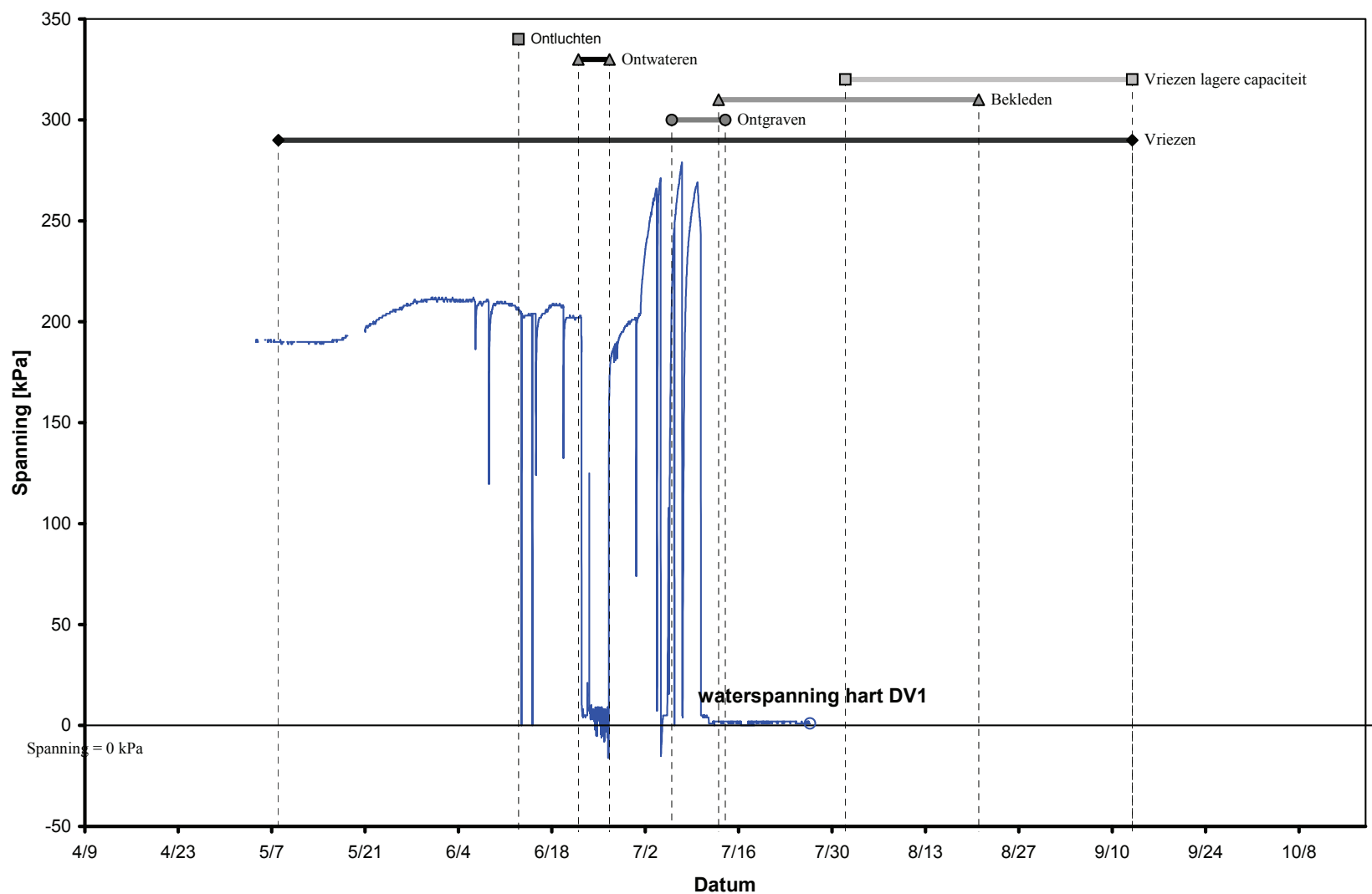
Vibrating wire waterspanningsmeter (VW1) » Absolute waterspanning versus Temperatuur en Datum



Vibrating wire waterspanningsmeter (VW1) » Relatieve waterspanning versus Temperatuur en Datum



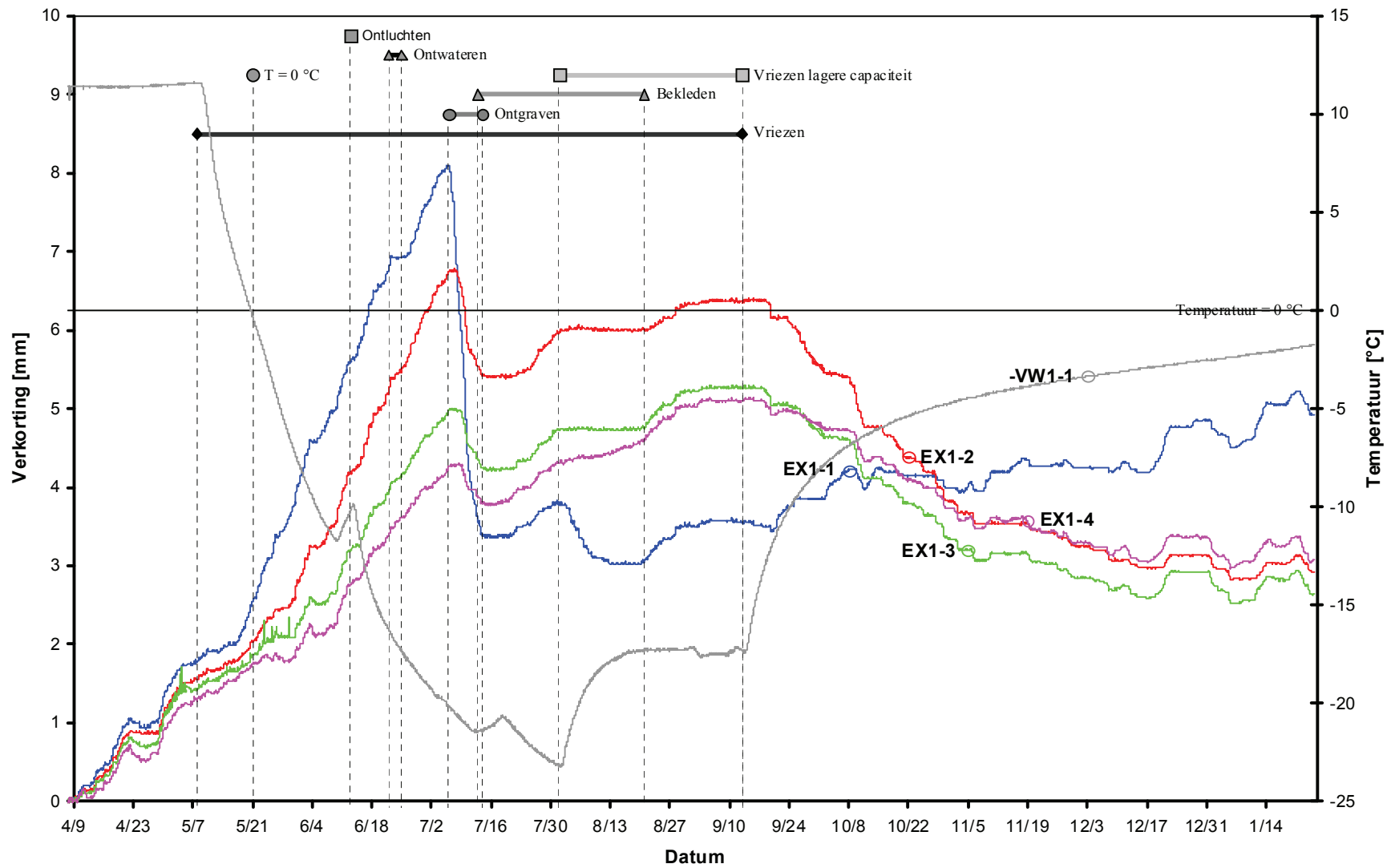
Waterspanningsmeter hart dwarsverbinding 1 » Absolute waterspanning versus Datum



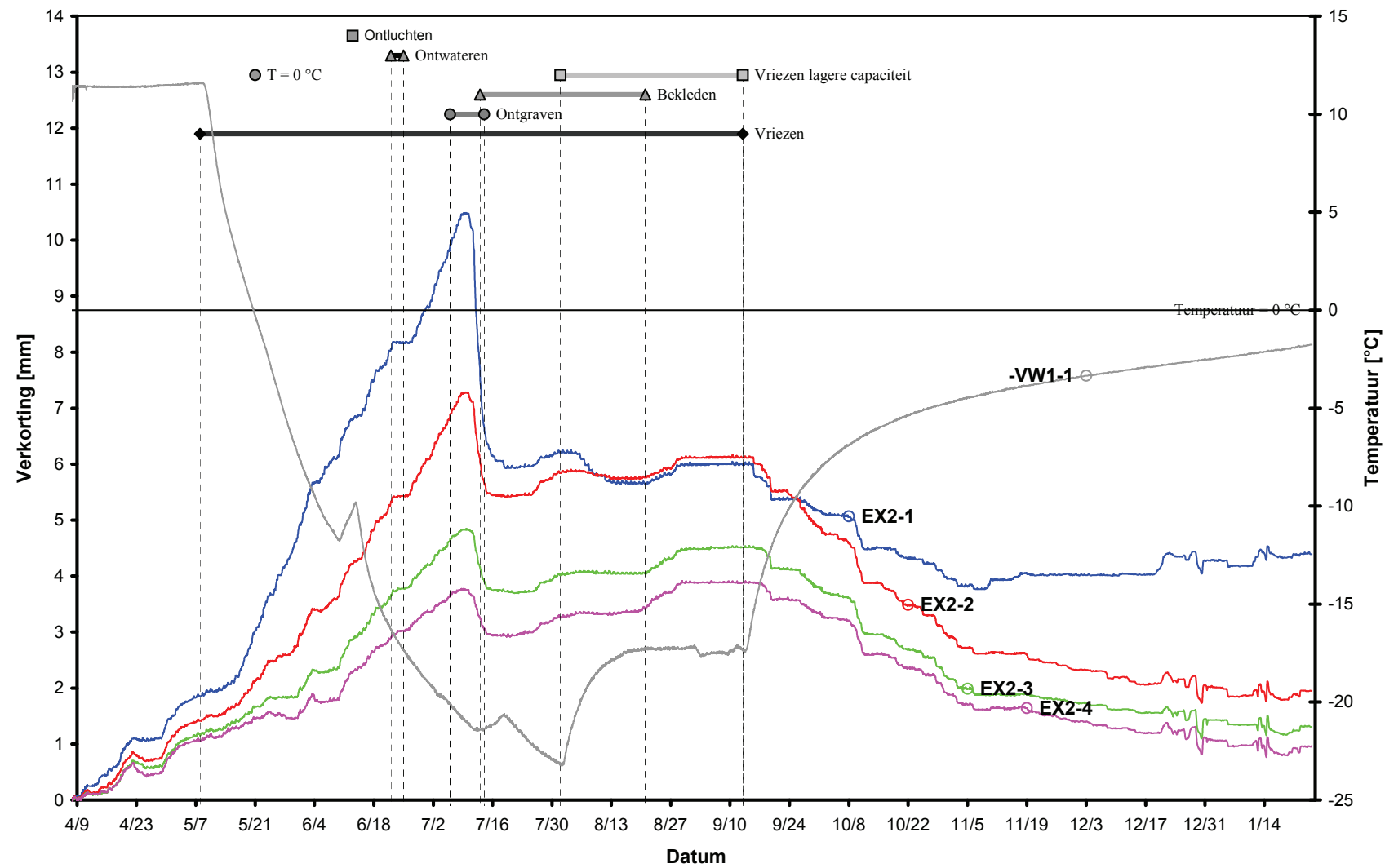
BIJLAGE H

DEFORMATIE EX EN HE BIJ DV1

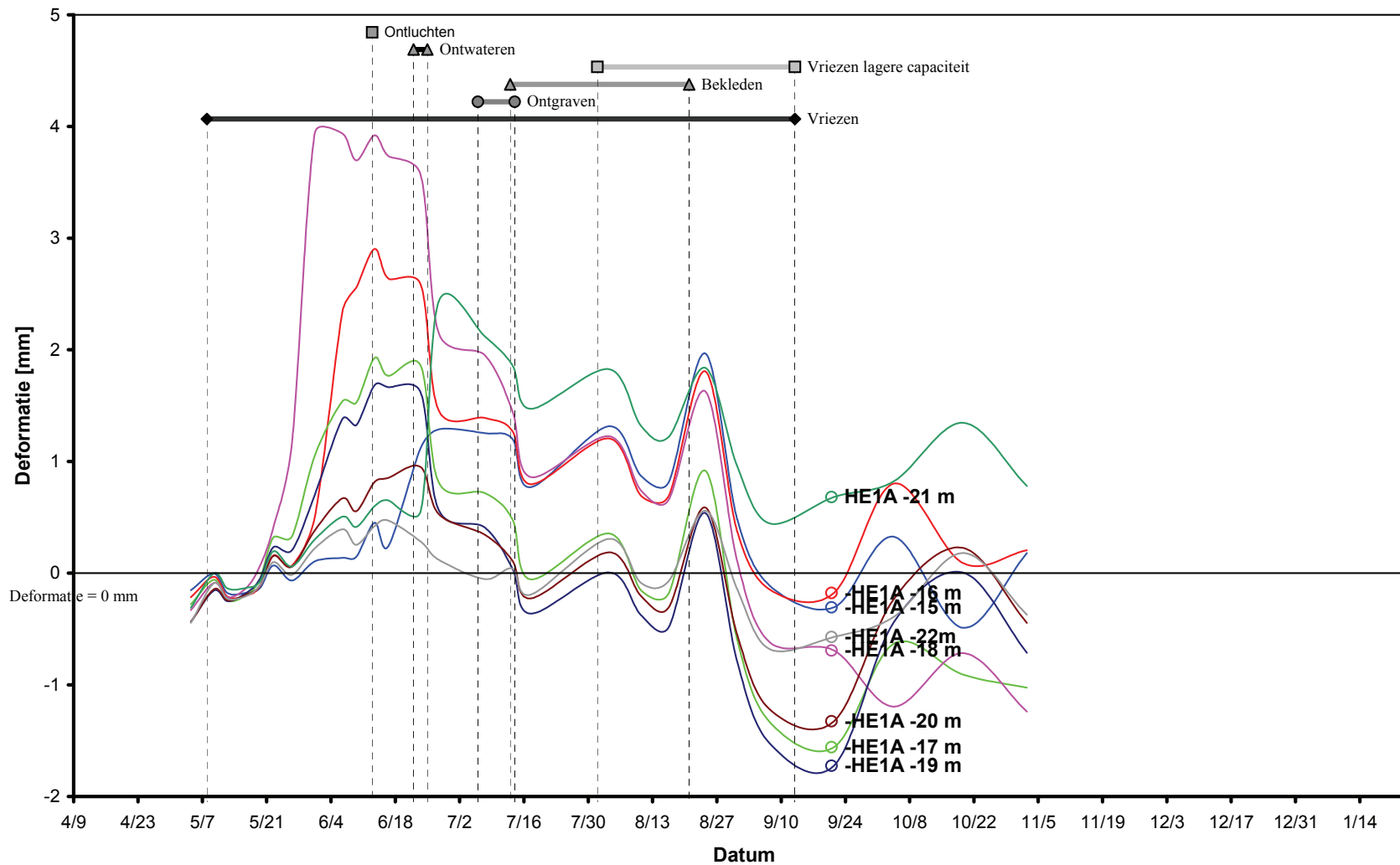
Extensometer 1 (EX1) » Absolute verticale deformatie versus Temperatuur en Datum



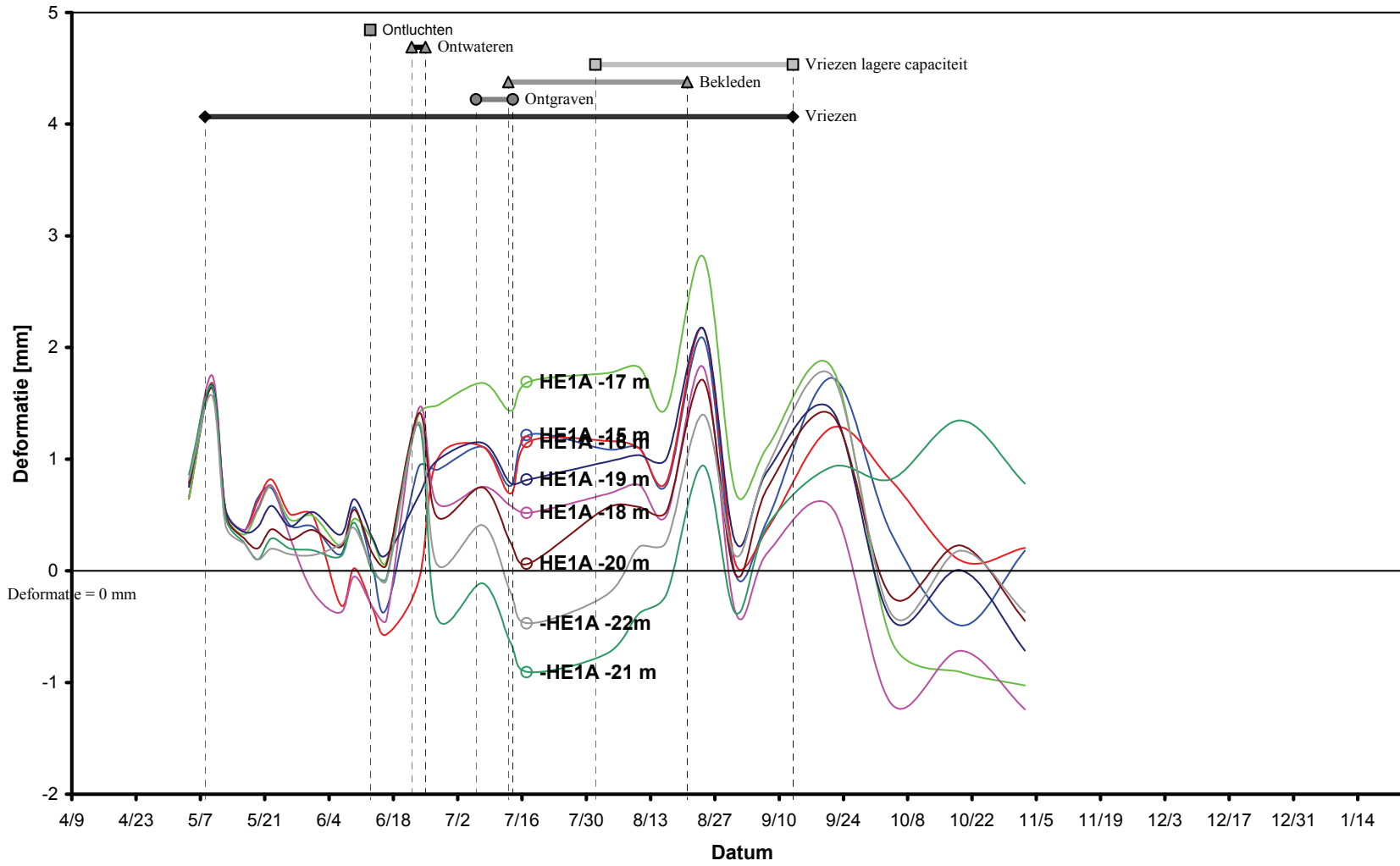
Extensometer 2 (EX2) » Absolute verticale deformatie versus Temperatuur en Datum



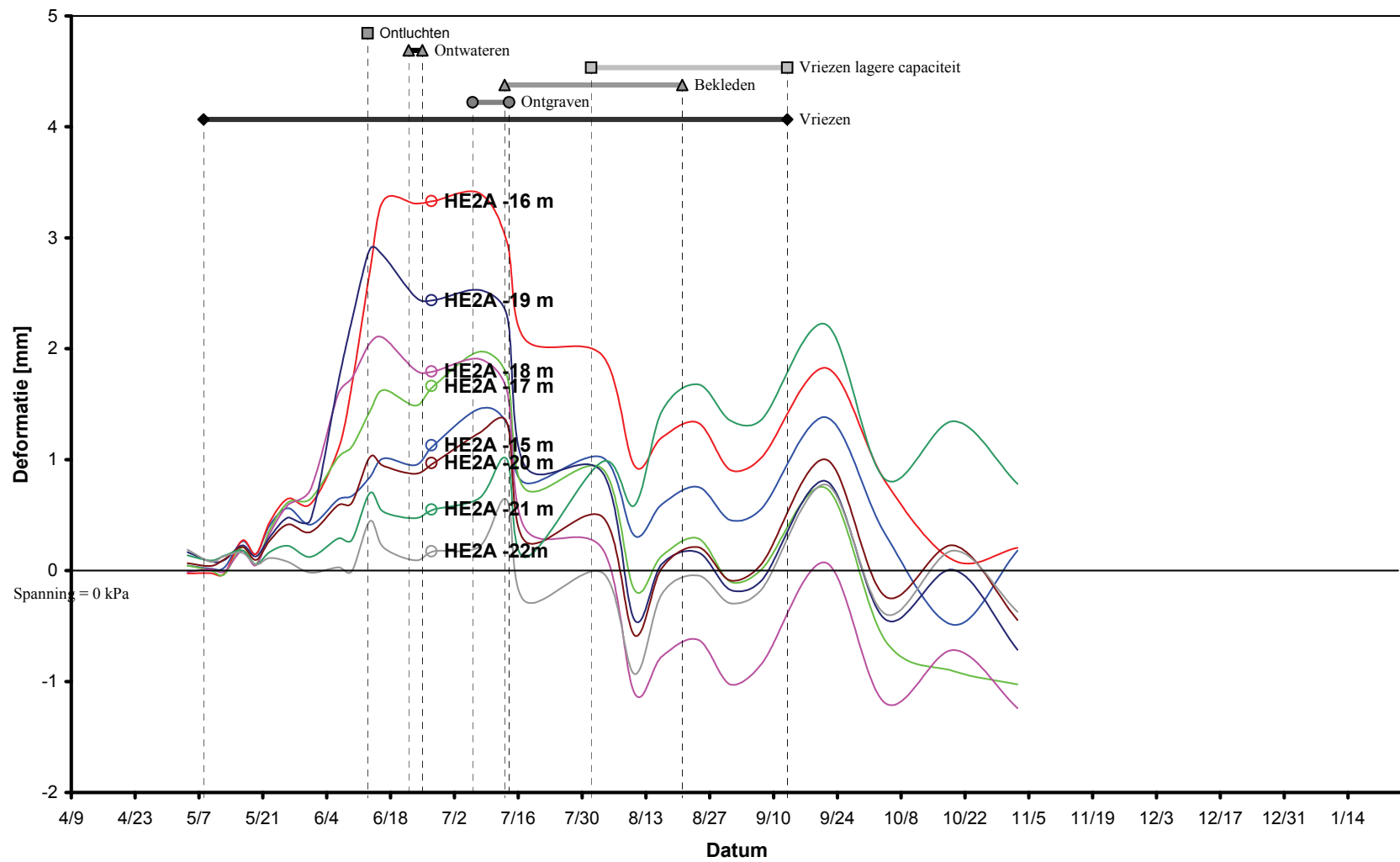
**Hellingmeetbuis 1, A richting (HE1A) » Relatieve gronddeformatie op dieptes NAP -15 t/m -22 m
versus Datum**



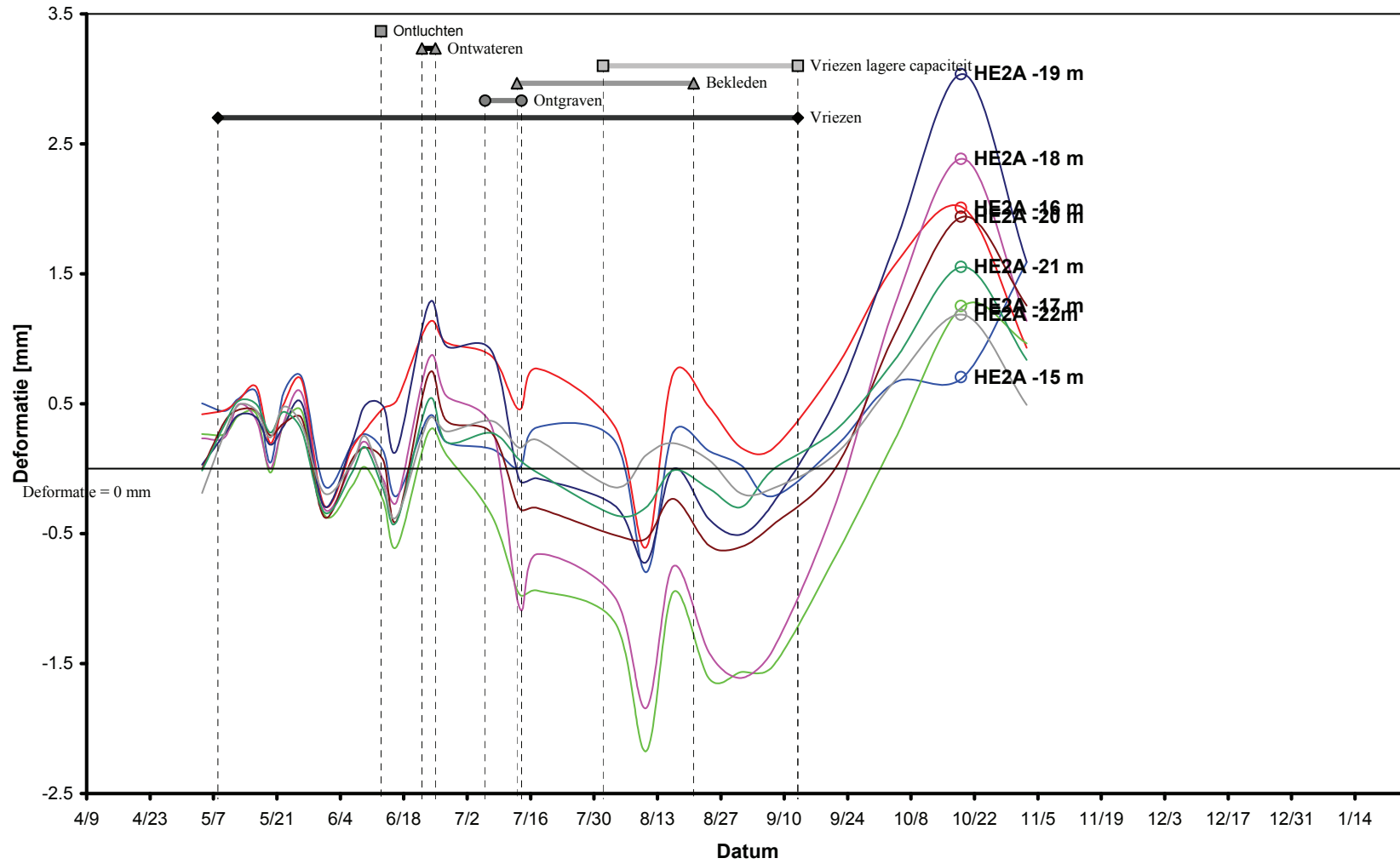
Hellingmeetbuis 1, B richting (HE1B) » Relatieve gronddeformatie op dieptes NAP -15 t/m -22 m versus Datum



Hellingmeetbuis 2, A richting (HE2A) » Relatieve gronddeformatie op dieptes NAP -15 t/m -22 m
versus Datum



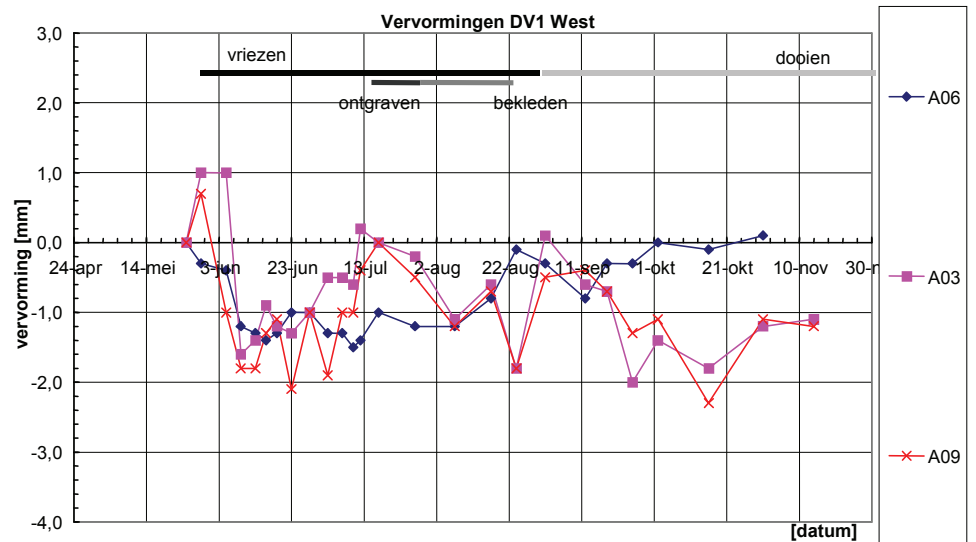
Hellingmeetbuis 2, B richting (HE2B) » Relatieve gronddeformatie op dieptes NAP -15 t/m -22 m versus Datum



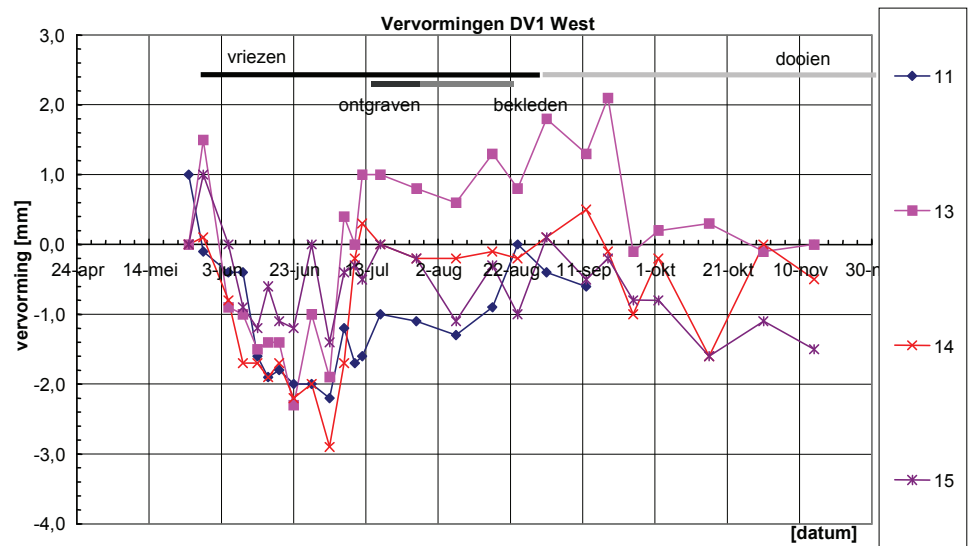
BIJLAGE I

TIJDGRAFIEKEN VAN VOEGVERPLAATSINGEN (A-PUNTEN) BIJ DV1

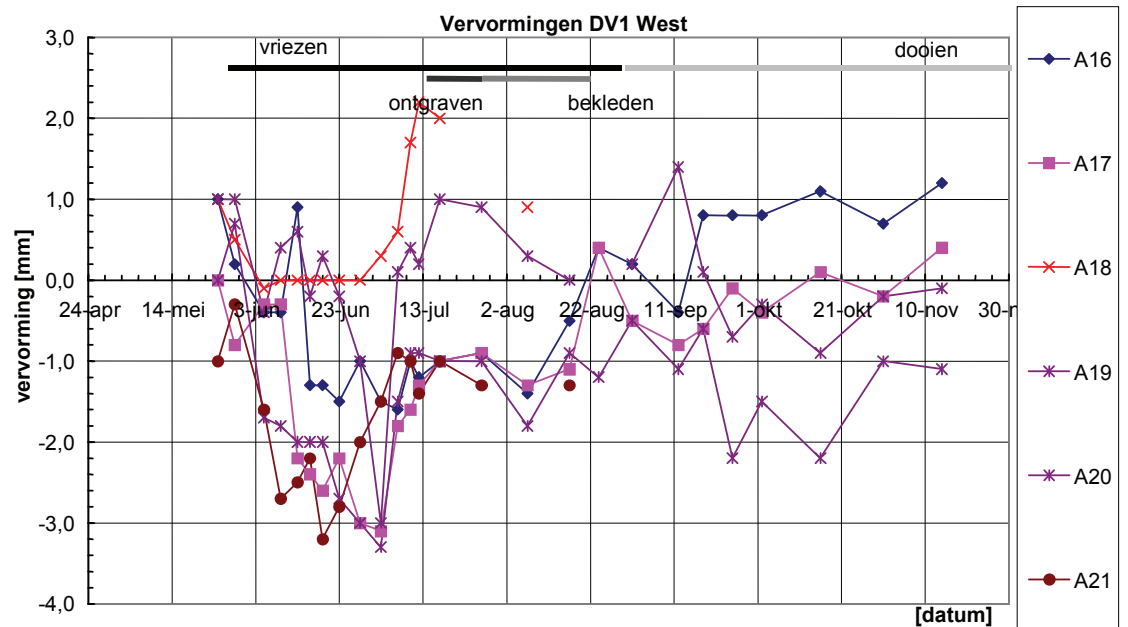
Figuur 7.5a Vervormingen A-punten A01, A02, A04 en A05; zie Deel 1 (par. 7.6)



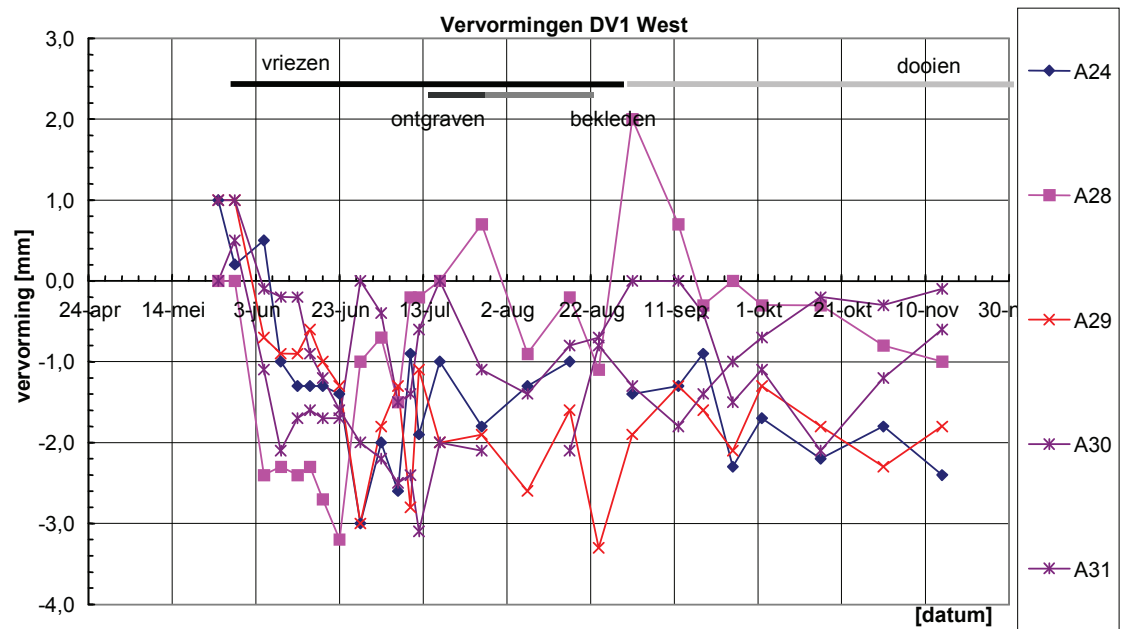
Figuur 7.5b Vervormingen A-punten A06, A03 en A09



Figuur 7.5c Vervormingen A-punten A11 tot en met A15



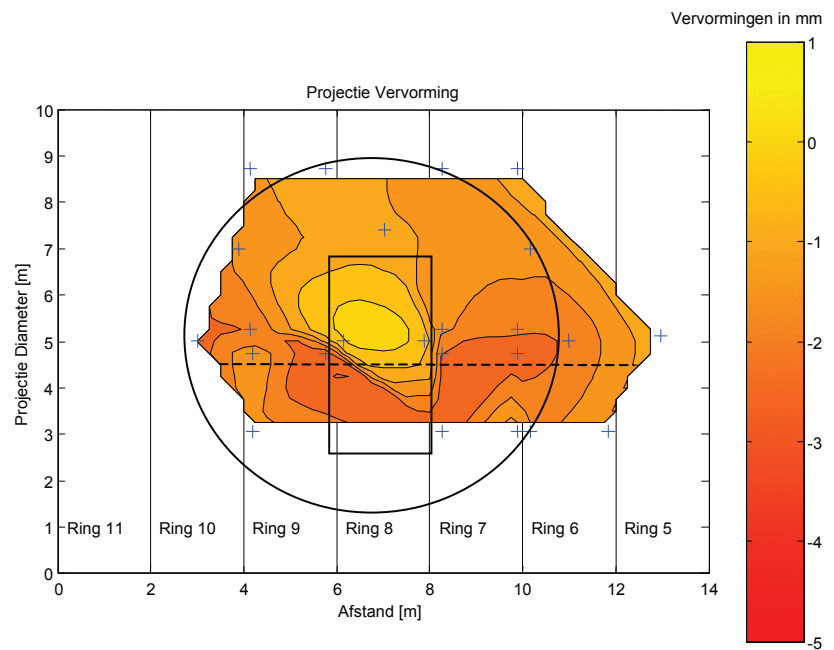
Figuur 7.5d Vervormingen A-punten A16 tot en met A21



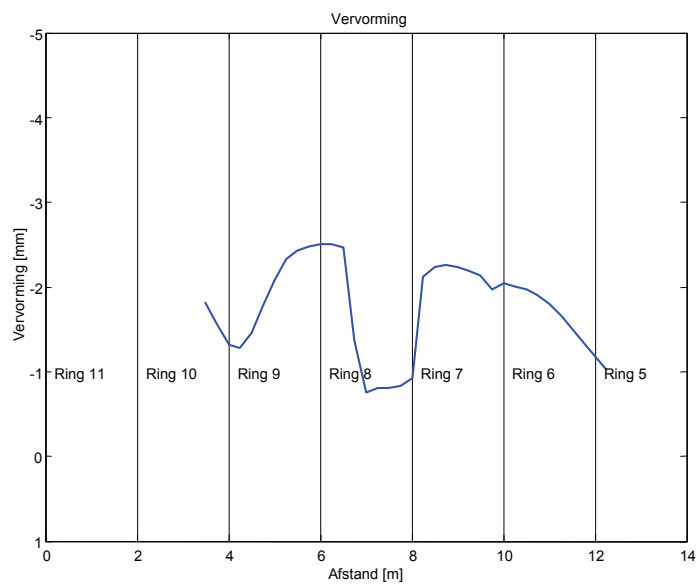
Figuur 7.5e Vervormingen A-punten A24 en A28 tot en met A31

BIJLAGE J

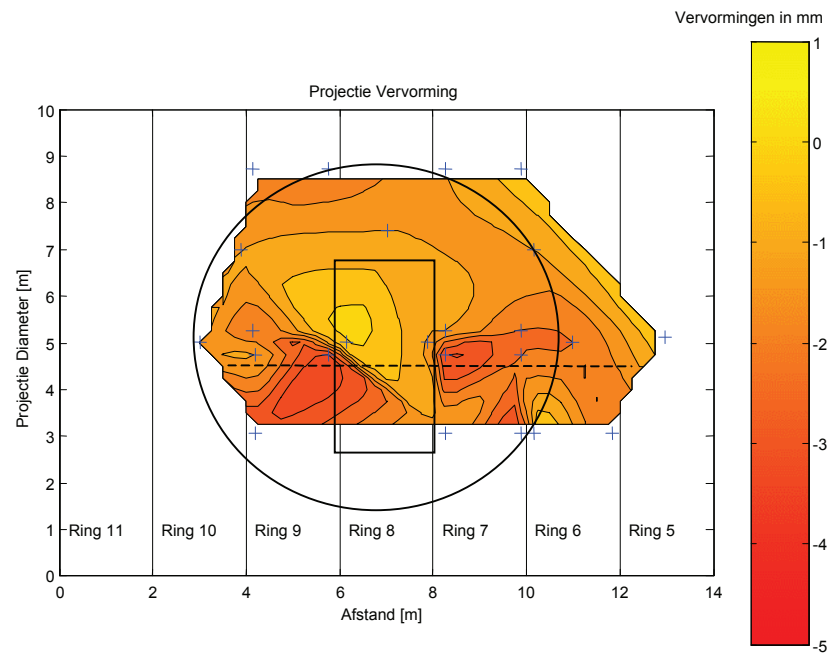
2D-PLOTS MET VOEGVERPLAATSINGEN (A-PUNTEN) BIJ DV1



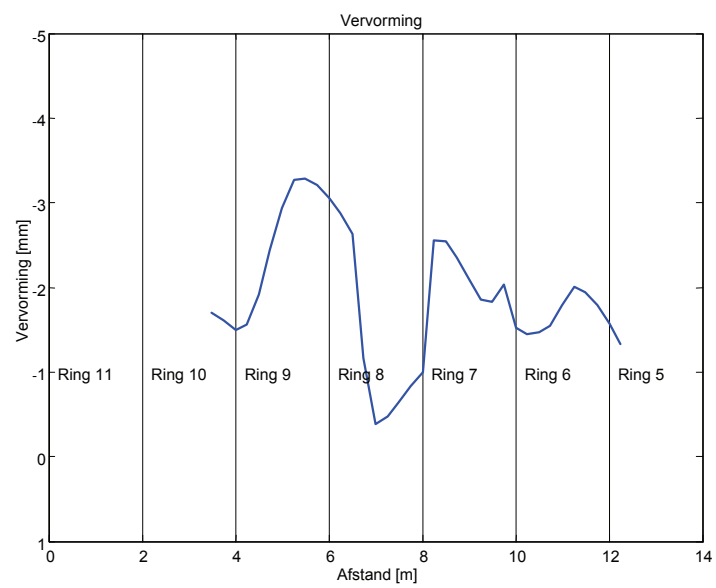
Overzicht verplaatsingen bij DV1 op 16 juni 2000



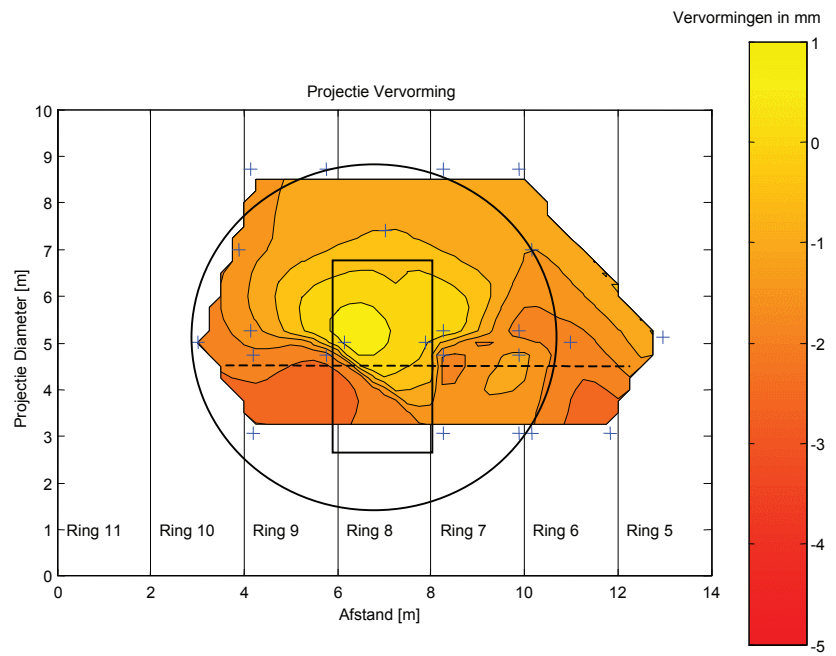
Grafiek met verplaatsingen bij DV1 op 16 juni 2000 (langs stippellijn in plot boven)



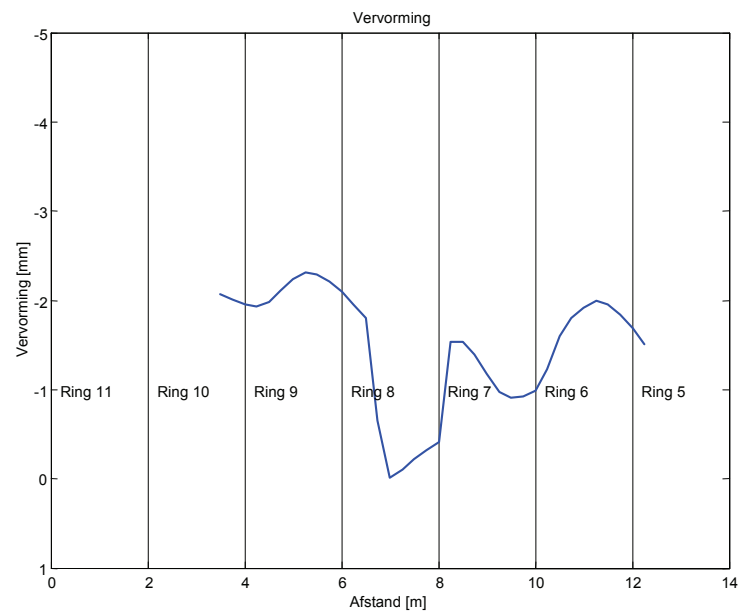
Overzicht verplaatsingen bij DV1 op 28 juni 2000



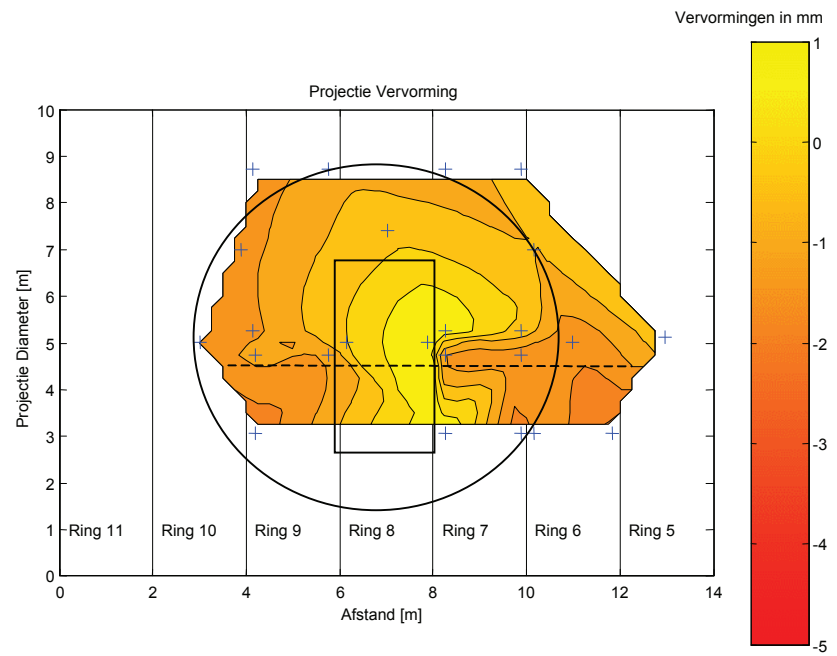
Grafiek met verplaatsingen bij DV1 op 28 juni 2000 (langs stippellijn in plot boven)



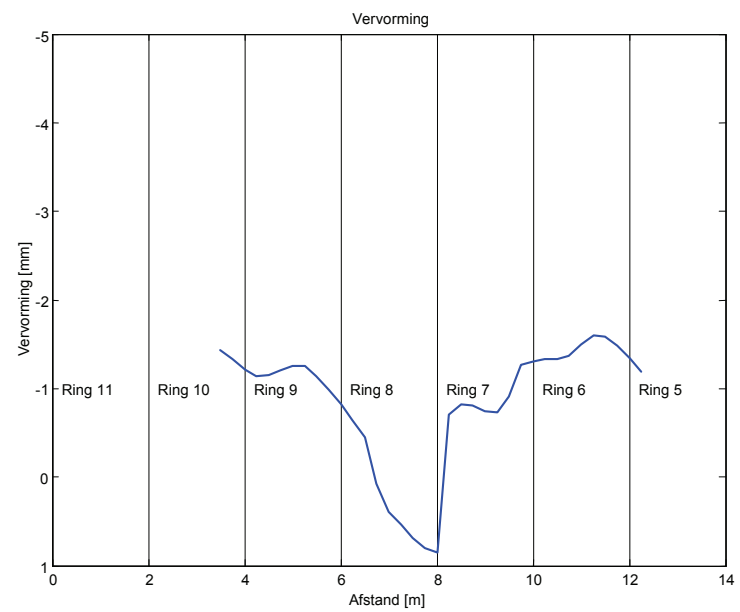
Overzicht verplaatsingen bij DV1 op 7 juli 2000



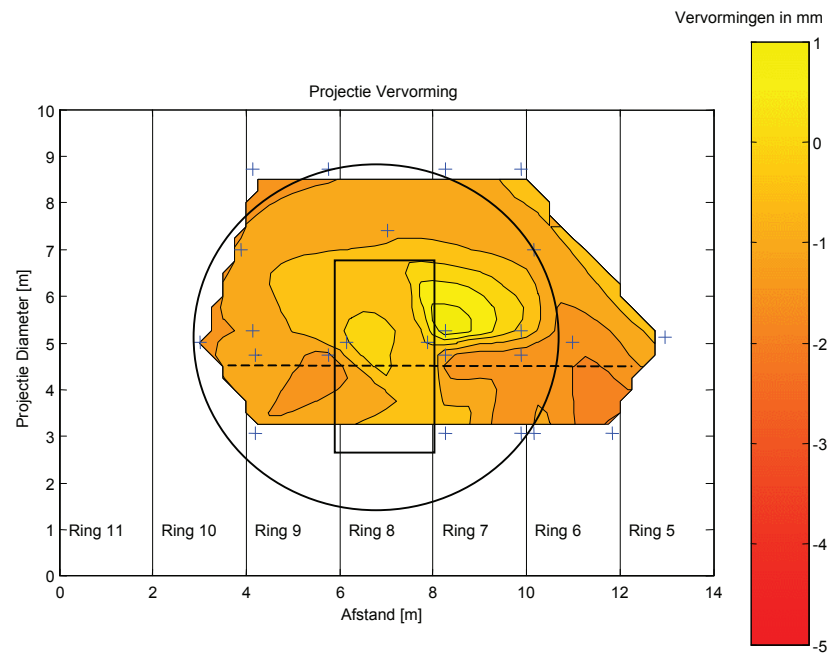
Grafiek met verplaatsingen bij DV1 op 7 juli 2000 (langs de stippellijn in plot boven)



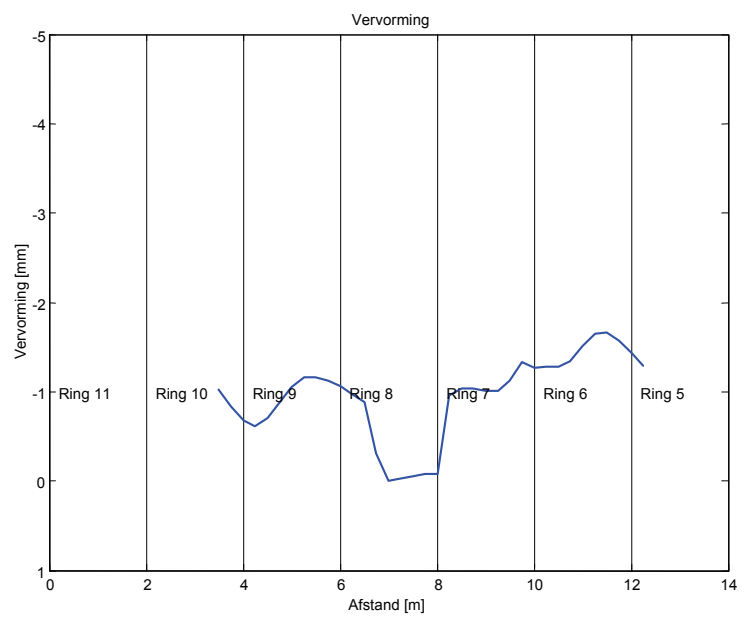
Overzicht verplaatsingen bij DV1 op 27 juli 2000



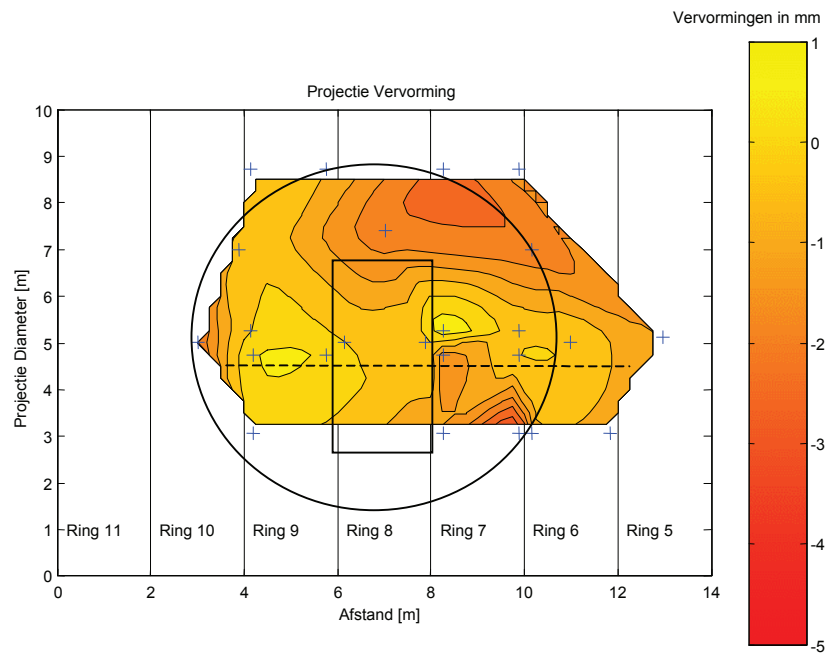
Grafiek met verplaatsingen bij DV1 op 27 juli 2000 (langs de stippellijn in plot boven)



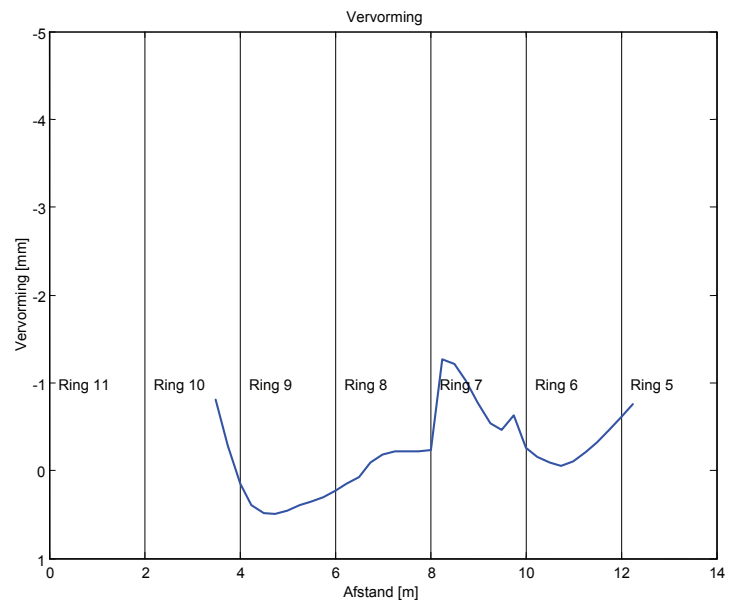
Overzicht verplaatsingen bij DV1 op 17 augustus 2000



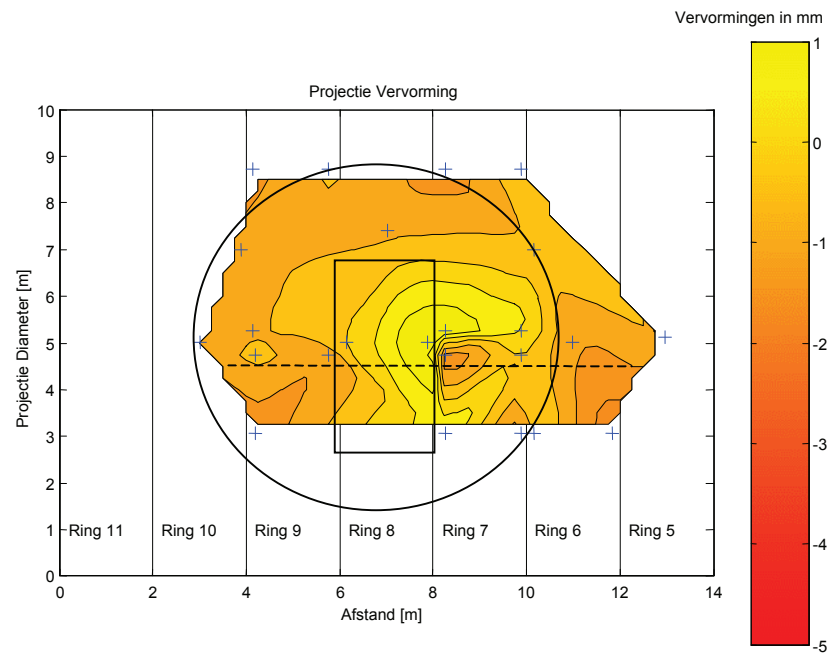
Grafiek met verplaatsingen bij DV1 op 17 augustus 2000 (langs de stippellijn in plot boven)



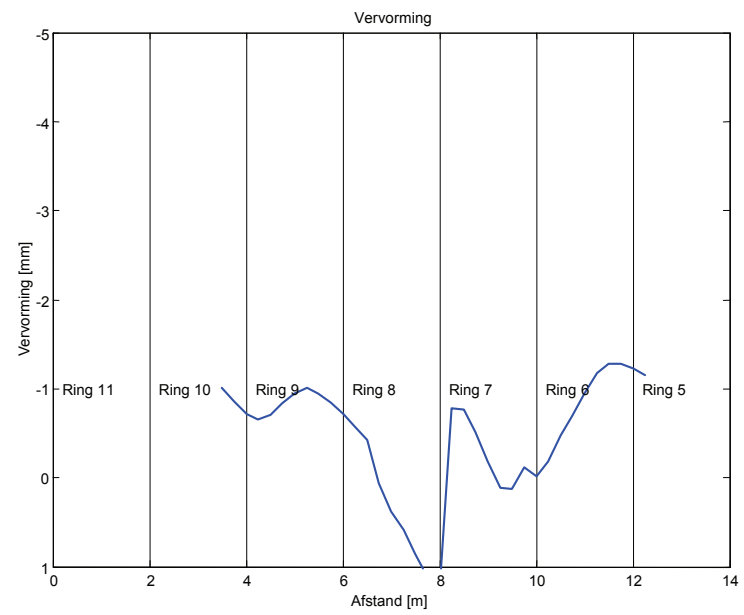
Overzicht verplaatsingen bij DV1 op 24 augustus 2000



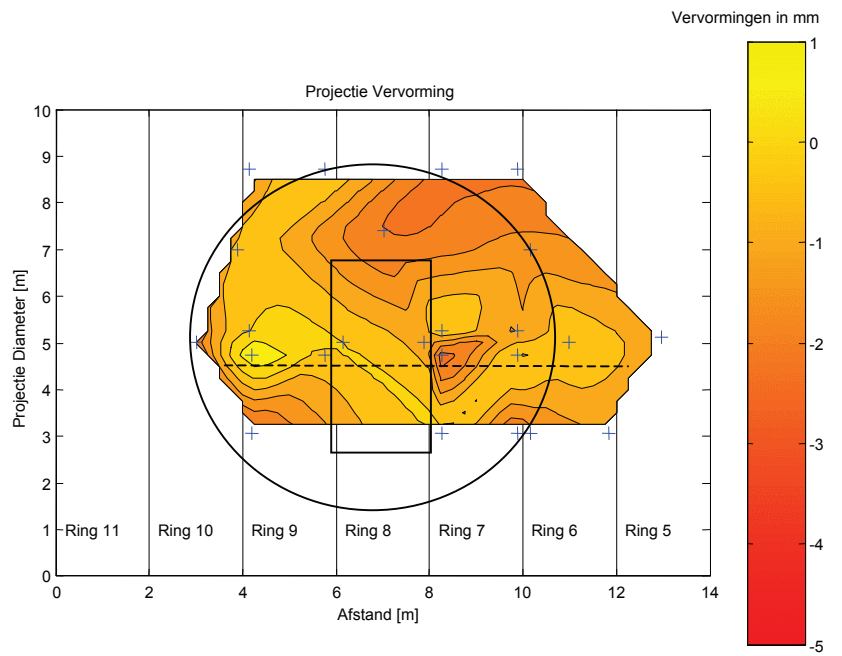
Grafiek met verplaatsingen bij DV1 op 24 augustus 2000 (langs stippellijn in plot boven)



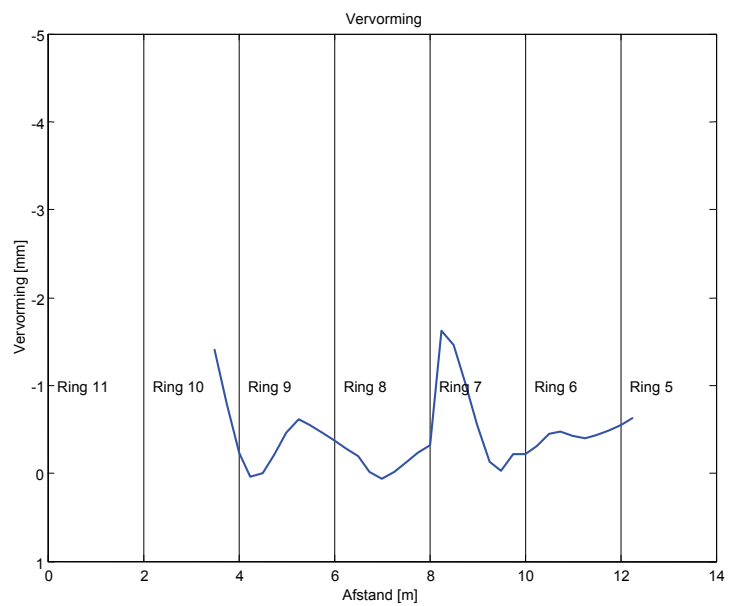
Overzicht verplaatsingen bij DV1 op 12 september 2000



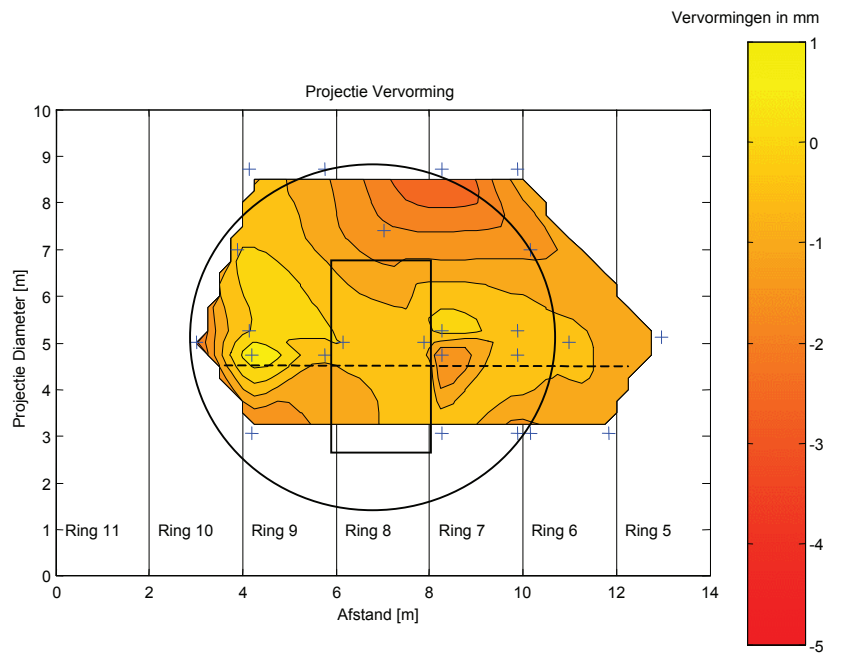
Grafiek met verplaatsingen bij DV1 op 12 september 2000 (langs de stippellijn in plot boven)



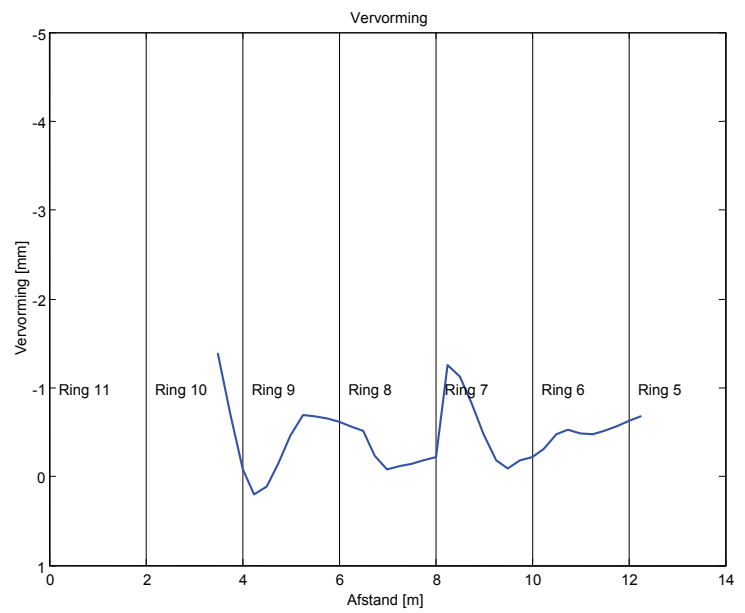
Overzicht verplaatsingen bij DV1 op 25 september 2000



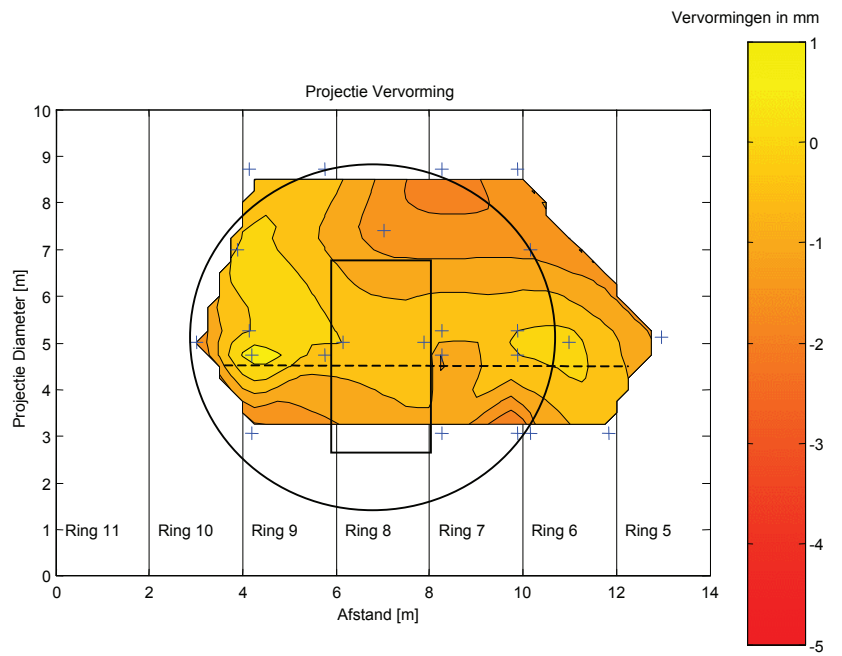
Grafiek met verplaatsingen bij DV1 op 25 september 2000 (langs de stippellijn in plot boven)



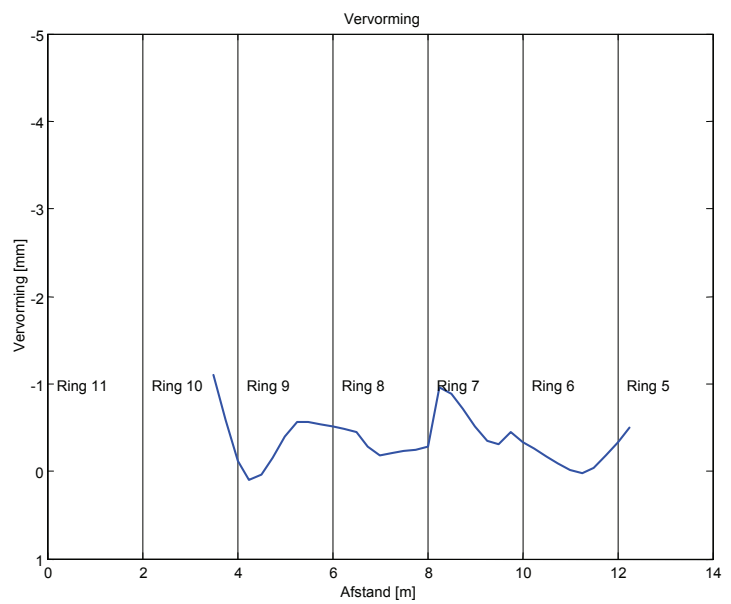
Overzicht verplaatsingen bij DV1 op 2 oktober 2000



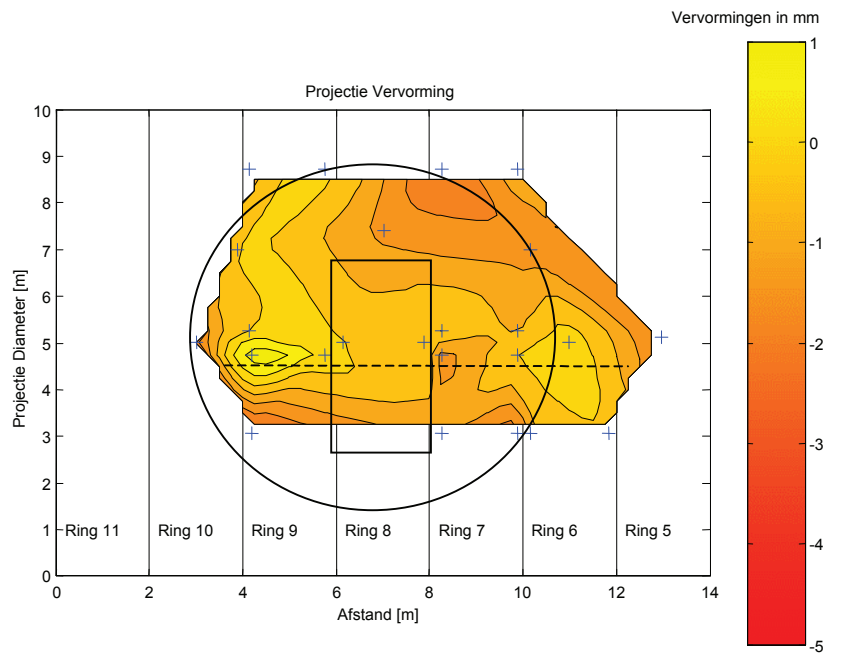
Grafiek met verplaatsingen bij DV1 op 2 oktober 2000 (langs de stippellijn in plot boven)



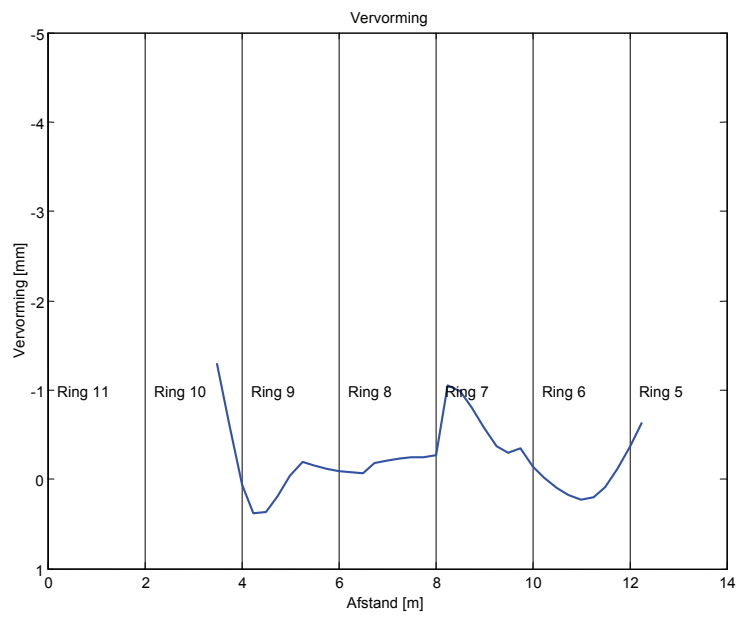
Overzicht verplaatsingen bij DV1 op 31 oktober 2000



Grafiek met voegverplaatsingen bij DV1 op 31 oktober 2000 (langs de stippellijn in plot boven)



Overzicht verplaatsingen bij DV1 op 14 november 2000

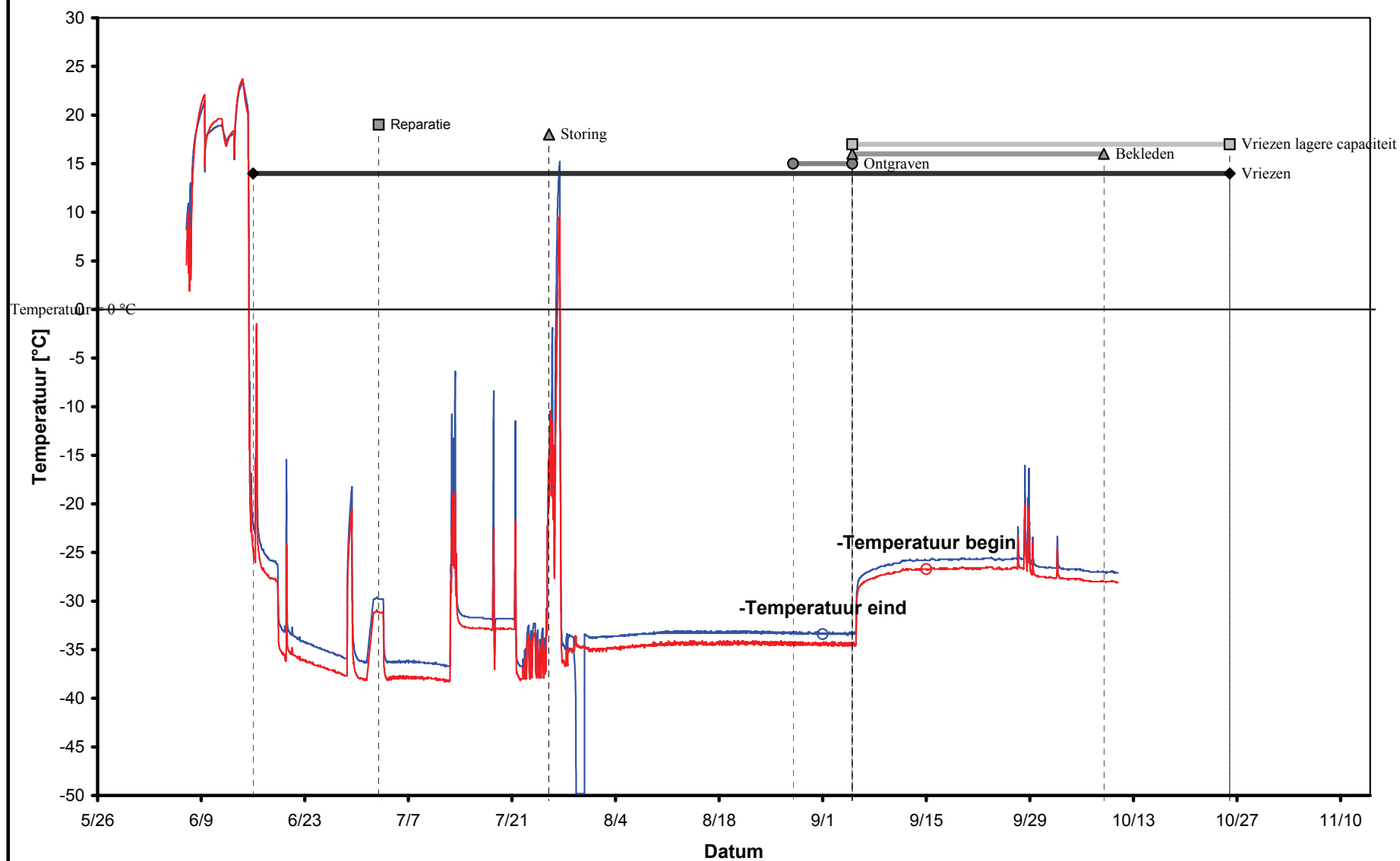


Grafiek met verplaatsingen bij DV1 op 14 november 2000 (langs de stippellijn in plot boven)

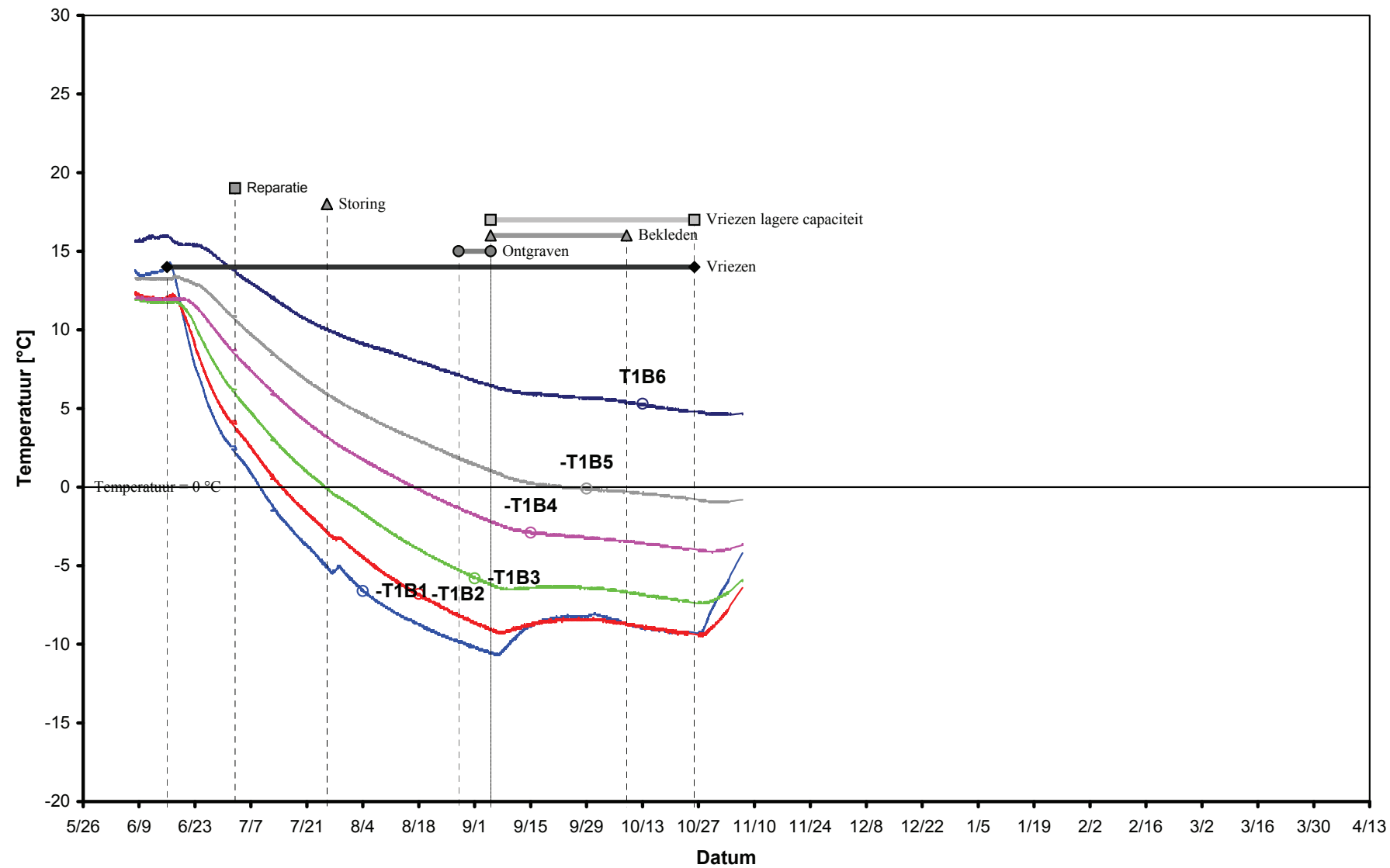
BIJLAGE K

TEMPERATUREN BIJ DV2

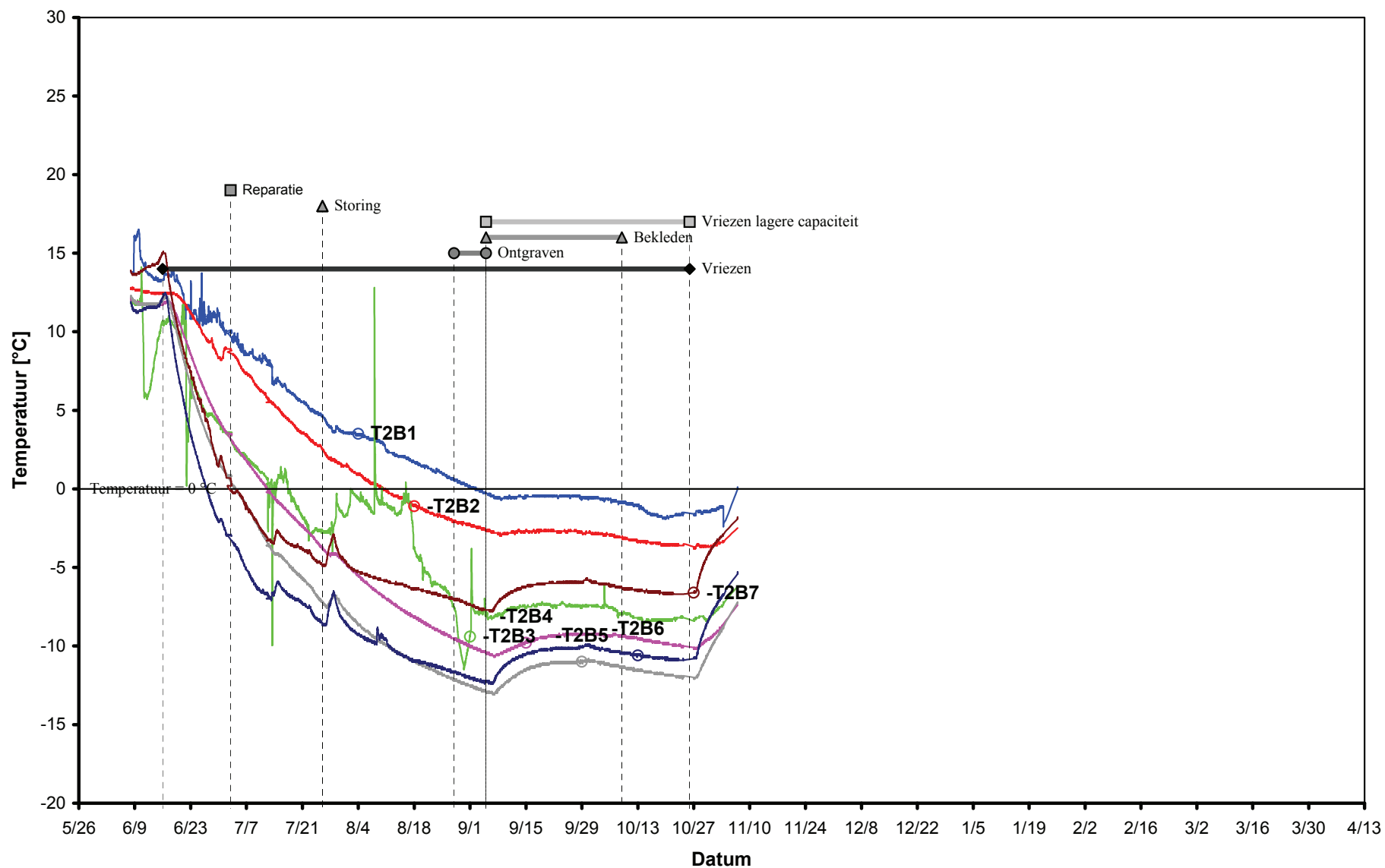
Vriesinstallatie DV2 » Temperaturen versus Datum



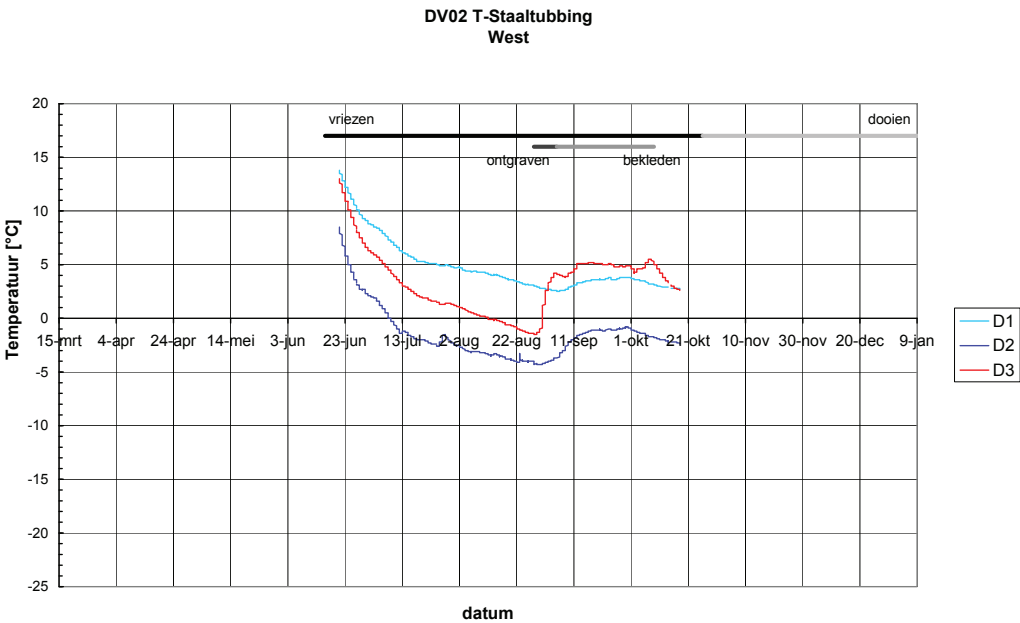
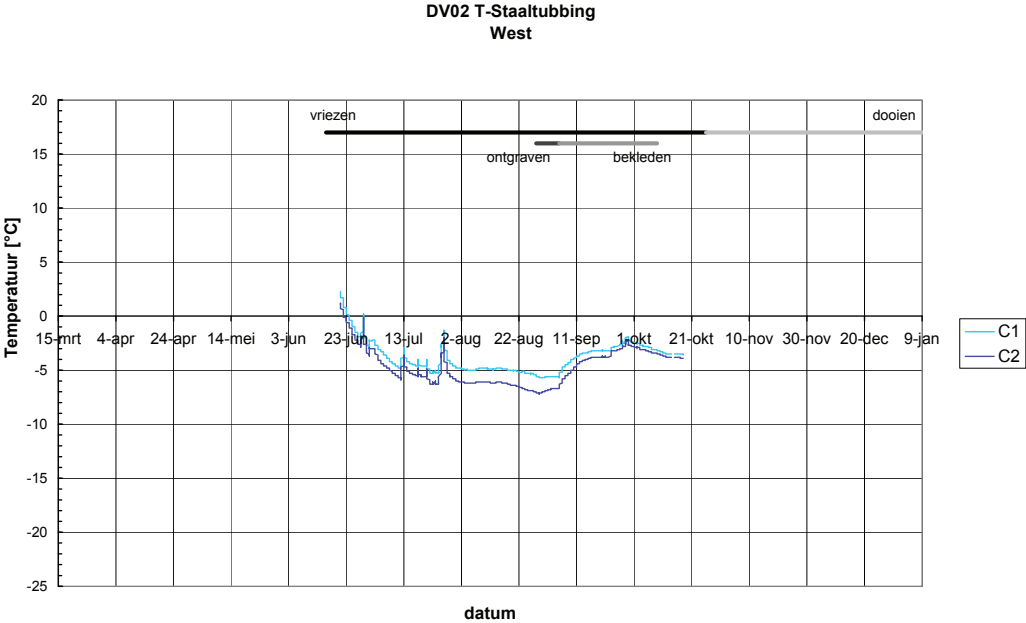
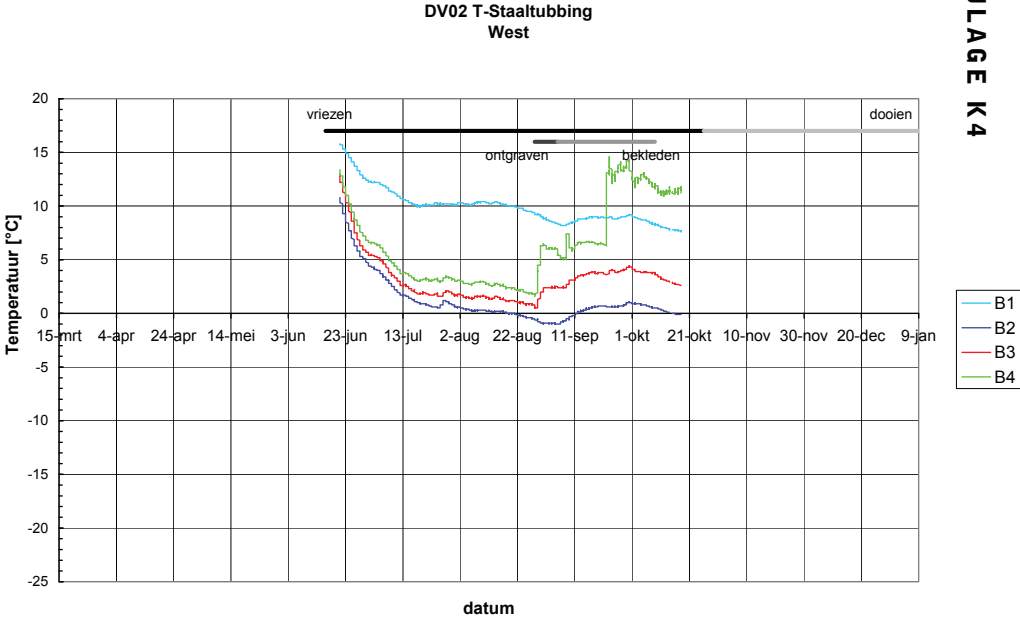
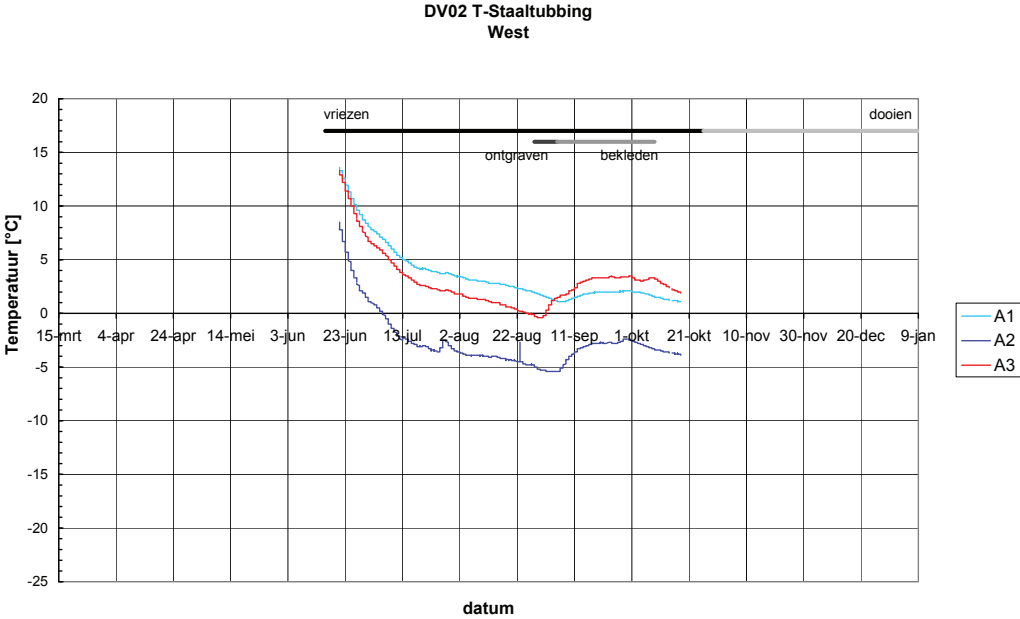
Temperatuurmeetlans (T1B) DV2 » Temperaturen versus Datum



Temperatuurmeetlans (T2B) DV2 » Temperaturen versus Datum

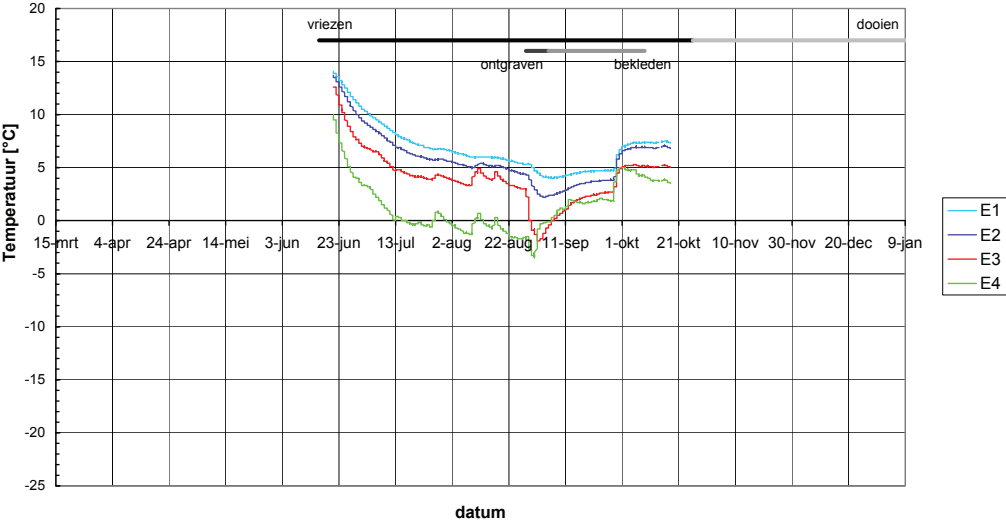


Temperaturen van tunnelsegmenten van de westbuis bij DV2

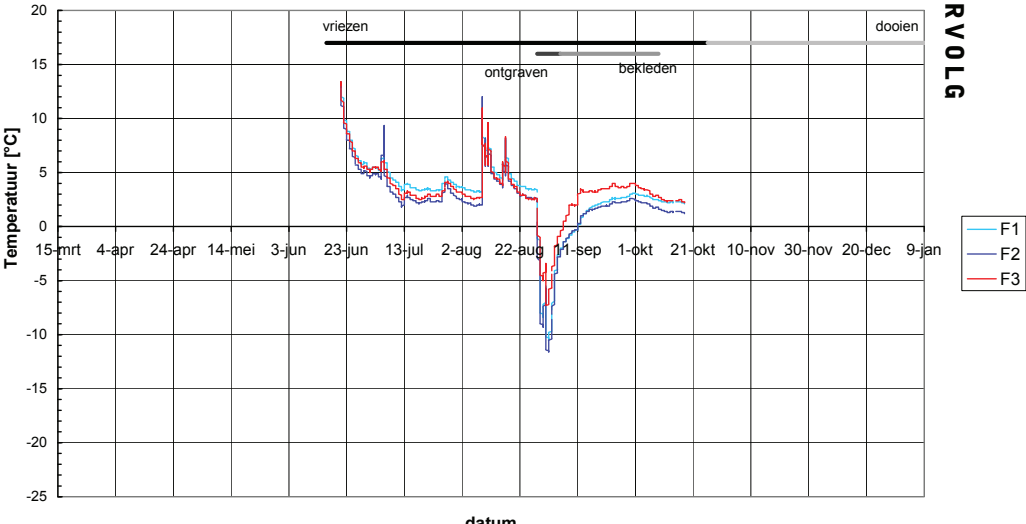


Temperaturen van tunnelsegmenten van de westbuis bij DV2 (vervolg)

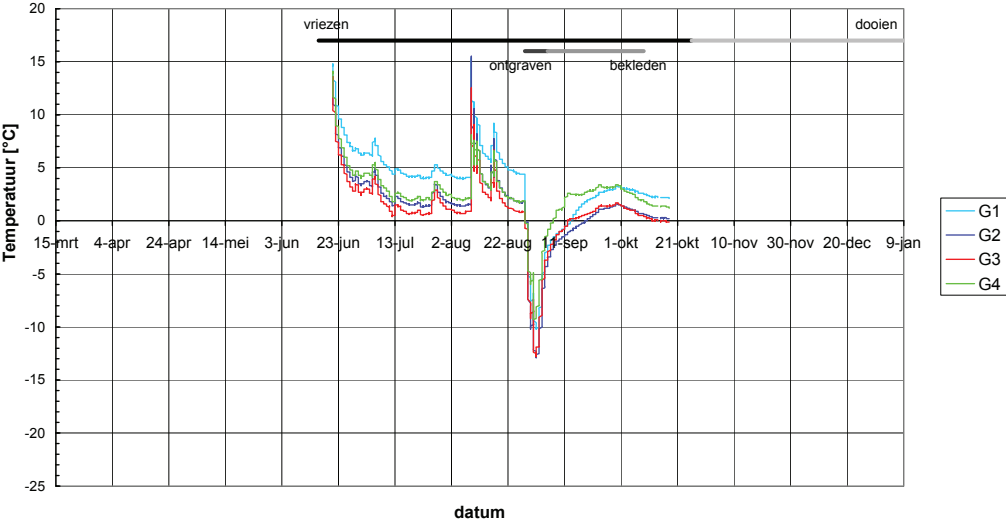
DV02 T-Staaltubbing
West



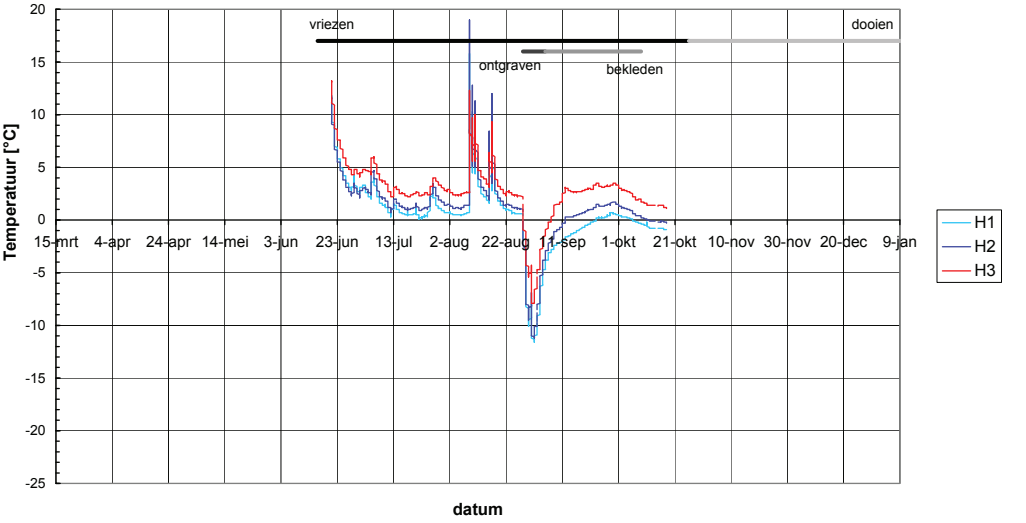
DV02 T-Staaltubbing
West



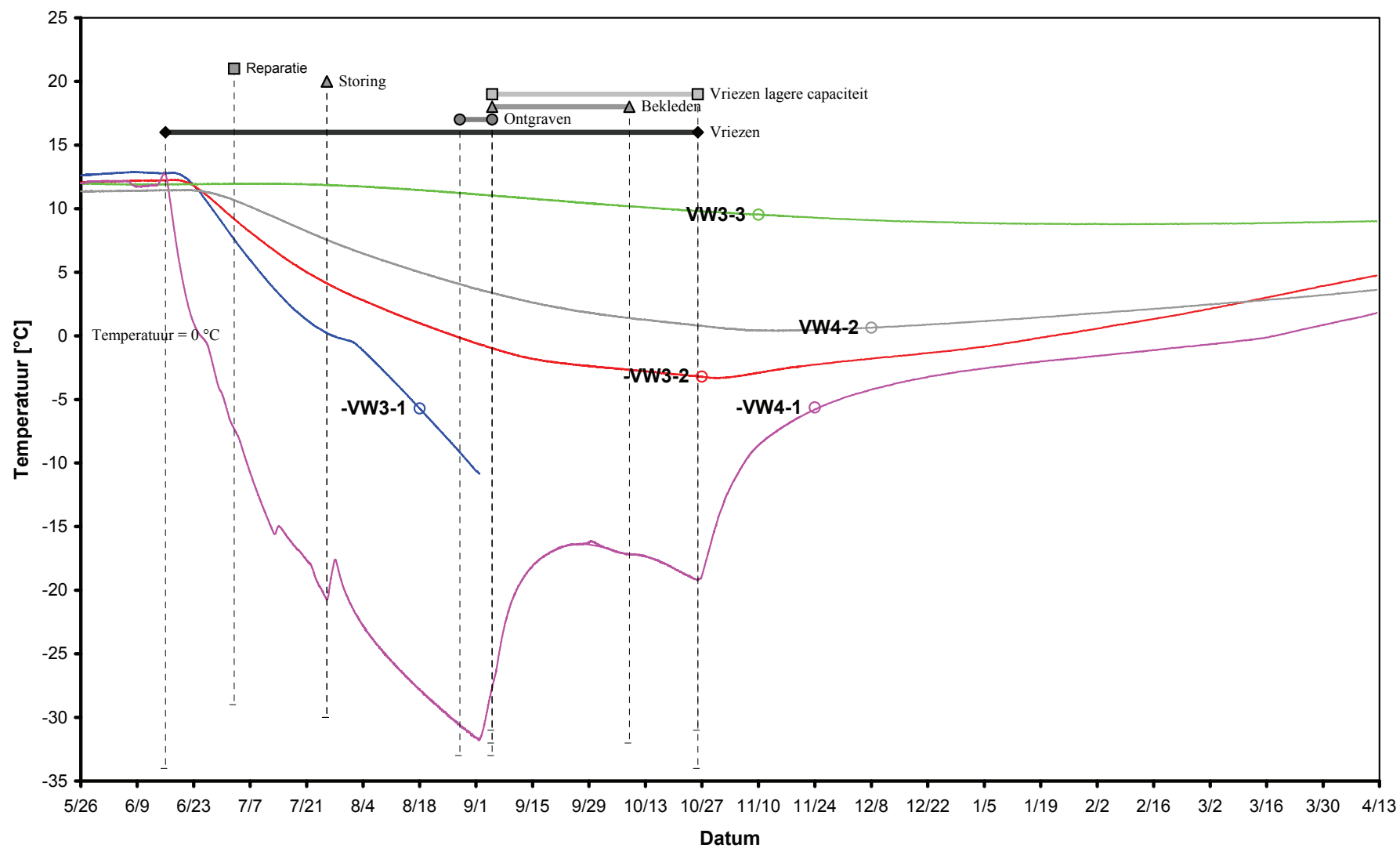
DV02 T-Staaltubbing
West



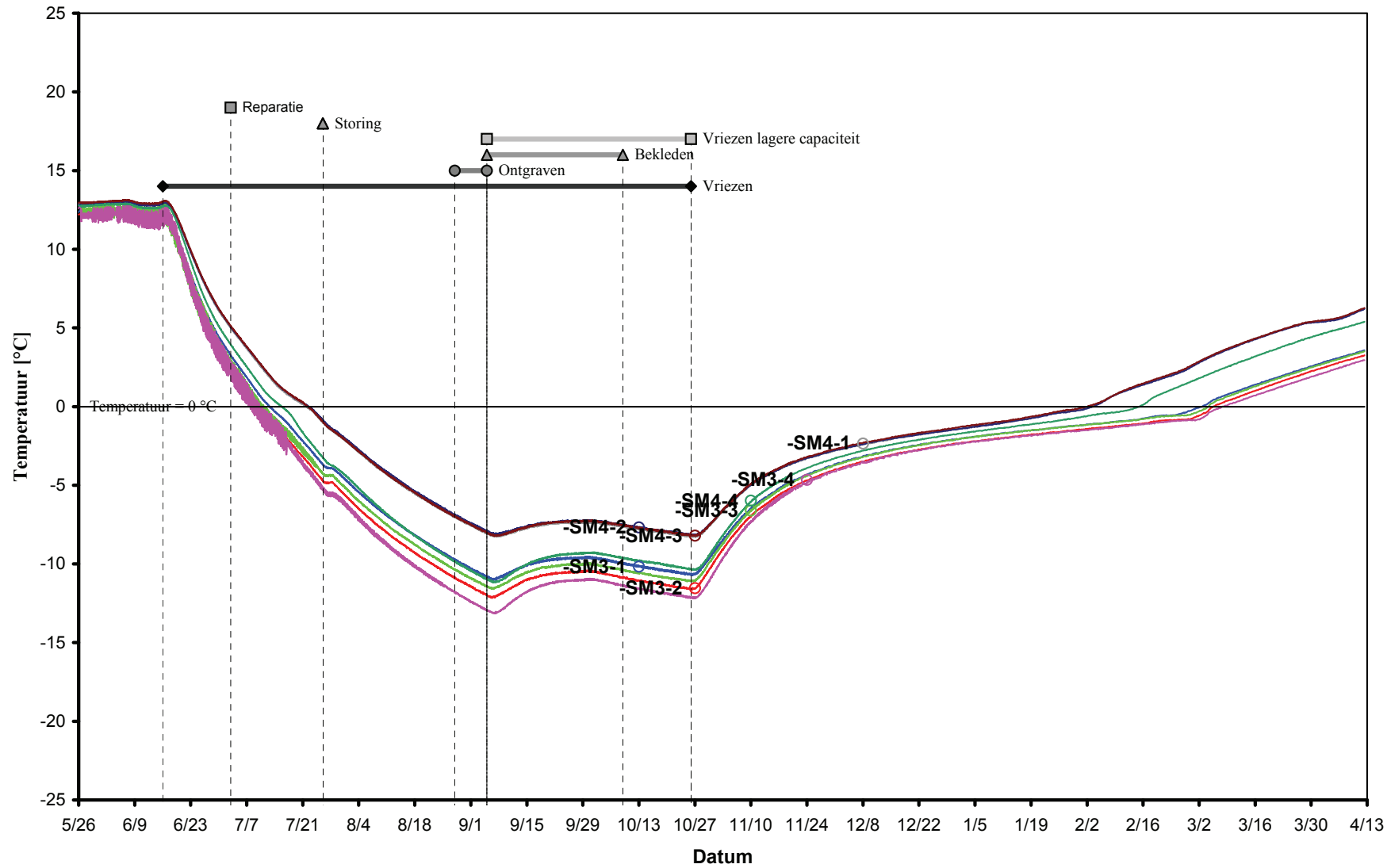
DV02 T-Staaltubbing
West



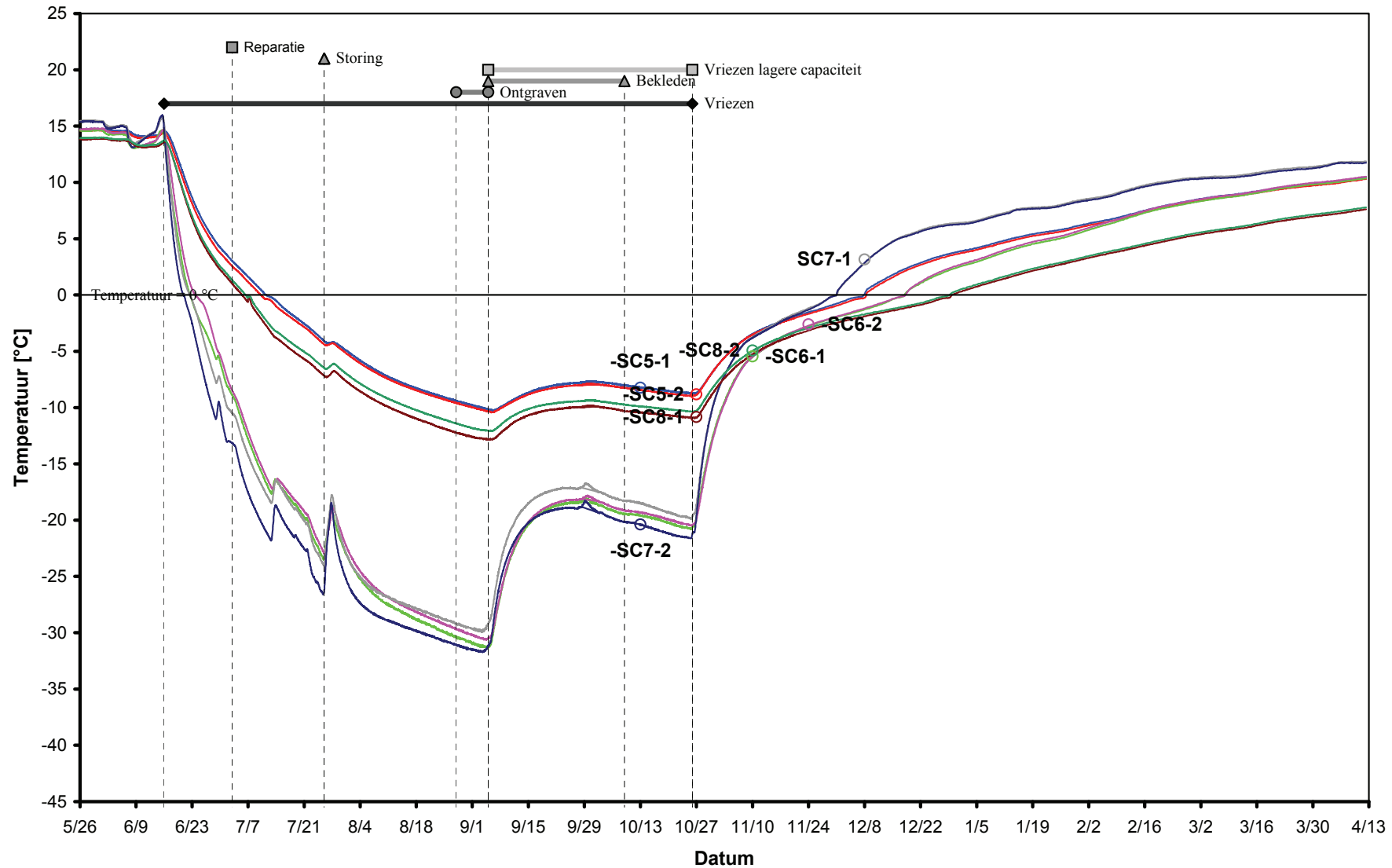
Vibrating wire waterspanningsmeters (VW3-1, VW3-2, VW4-1 en VW4-2) » Temperaturen versus Datum



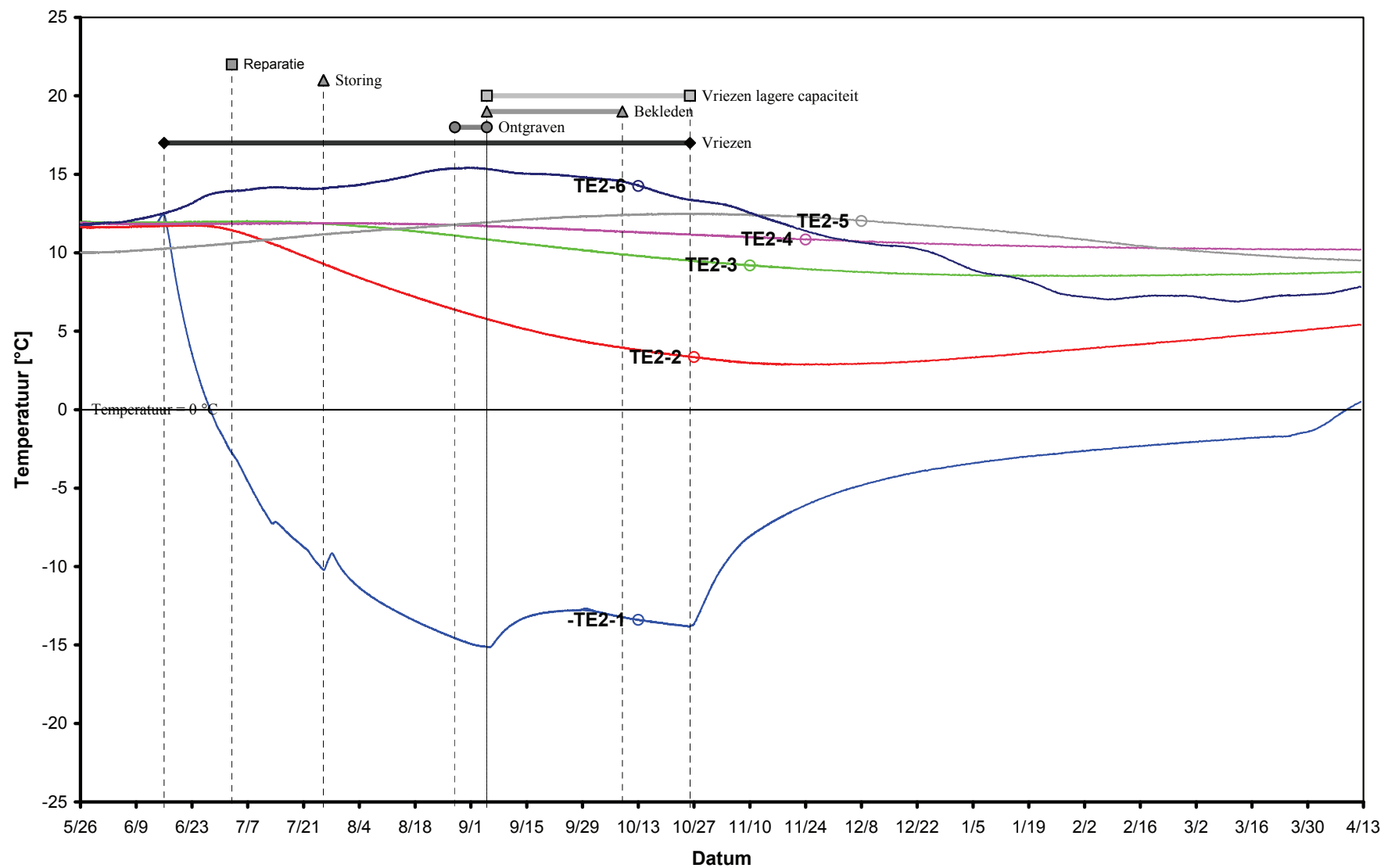
Stress monitoring stations (SM3 en SM4) » Temperaturen versus Datum



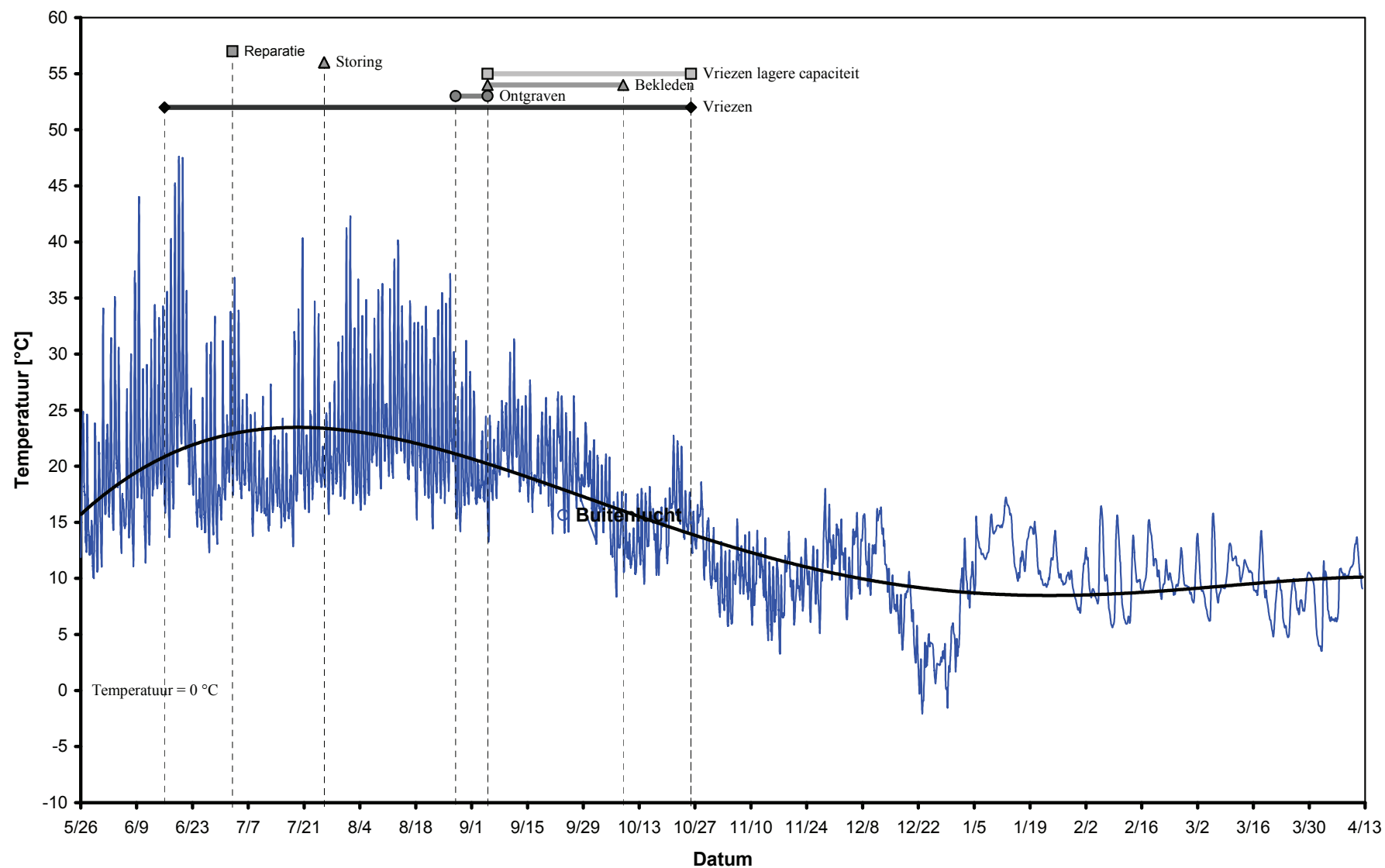
Spade cellen (SC5, SC6, SC7 en SC8) » Temperaturen versus Datum



Thermosensoren 2 (TE2-1 tot TE2-6) » Temperaturen versus Datum



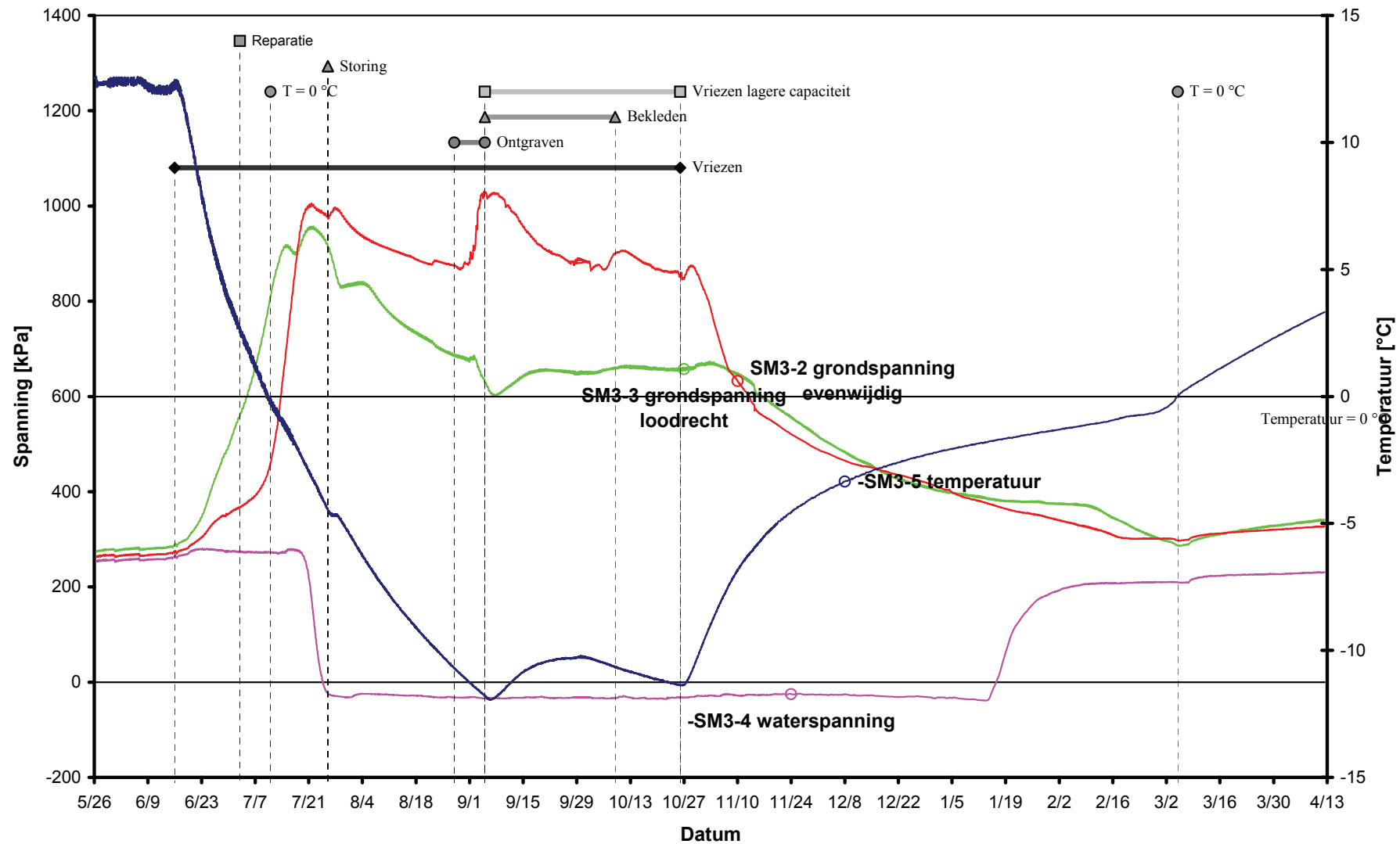
Data-acquisitiesysteem DV2 » Temperatuur versus Datum



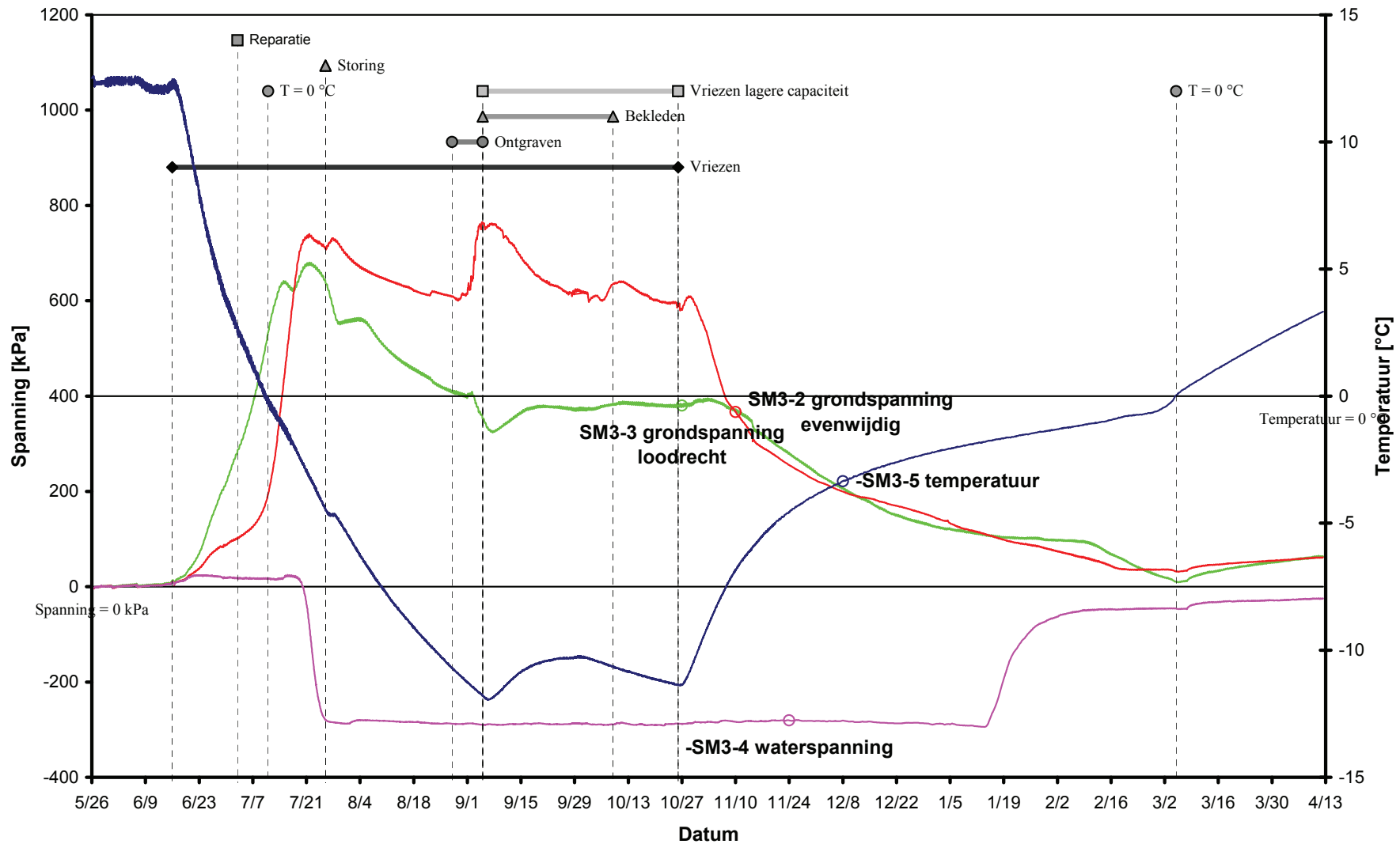
BIJLAGE L

SPANNINGEN SC, SM EN VW BIJ DV2

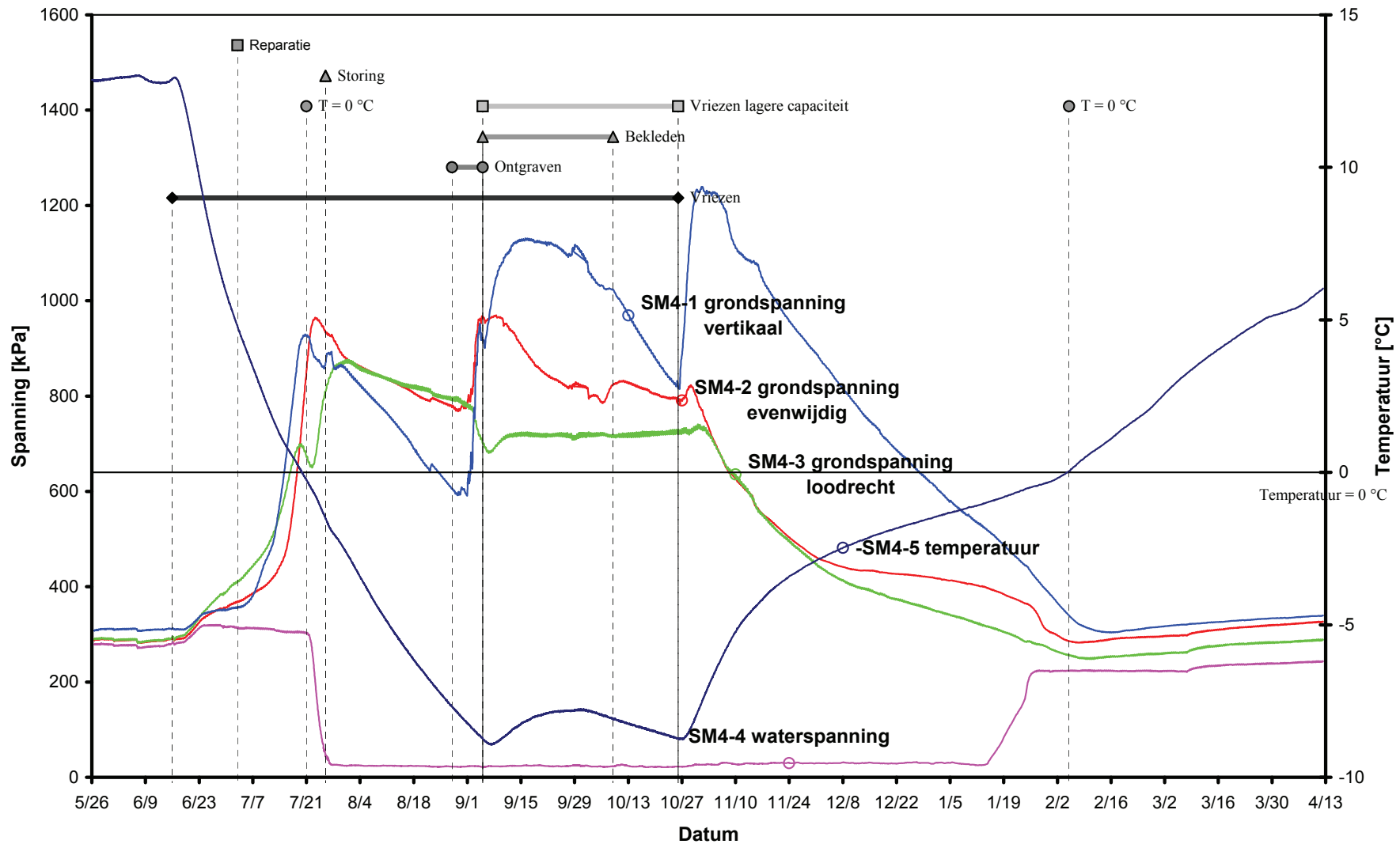
Stress monitoring station 3 (SM3) » Absolute grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum [exclusief SM3-1 vertikaal]



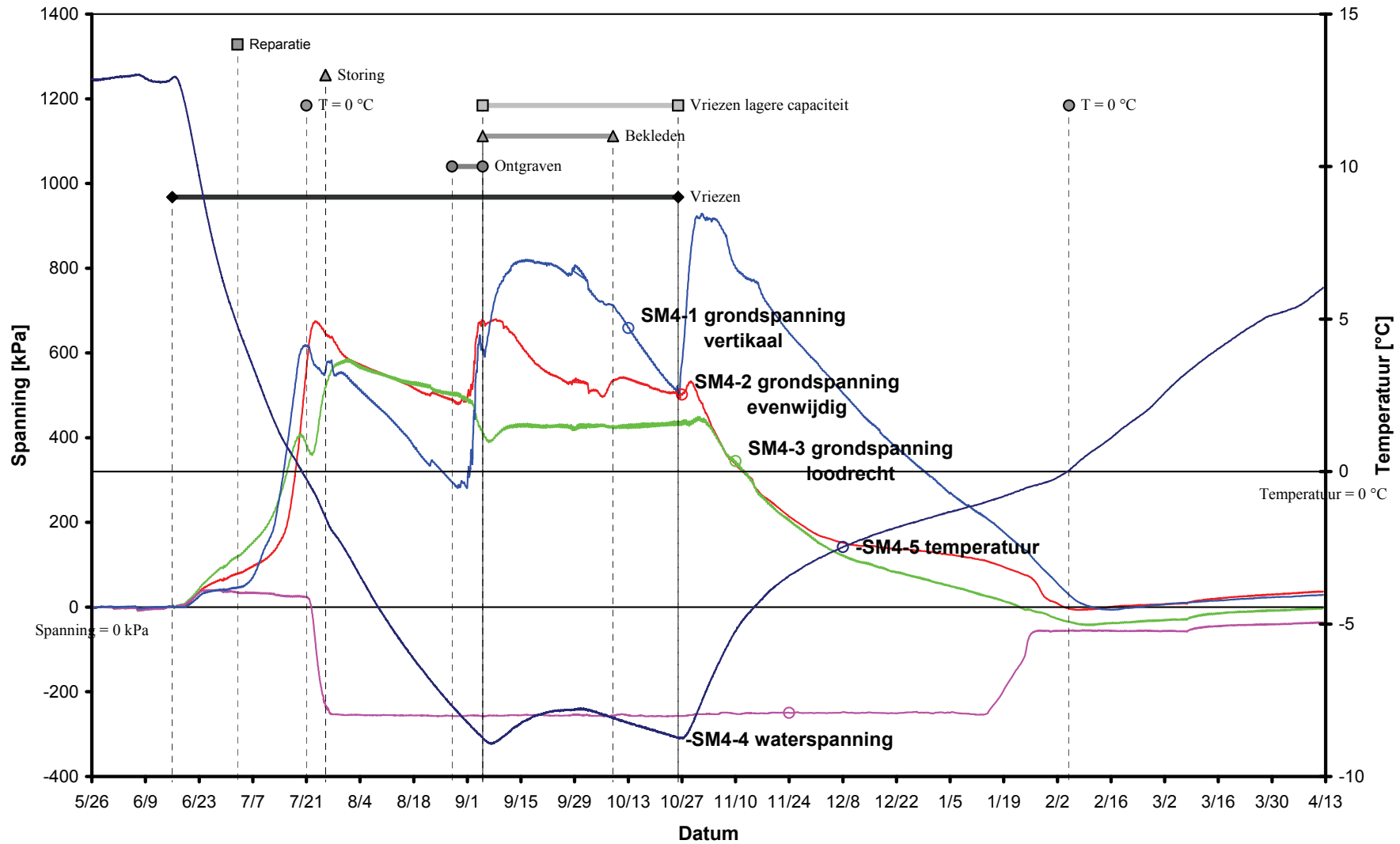
Stress monitoring station 3 (SM3) » Relatieve grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum [exclusief SM3-1 vertikaal]



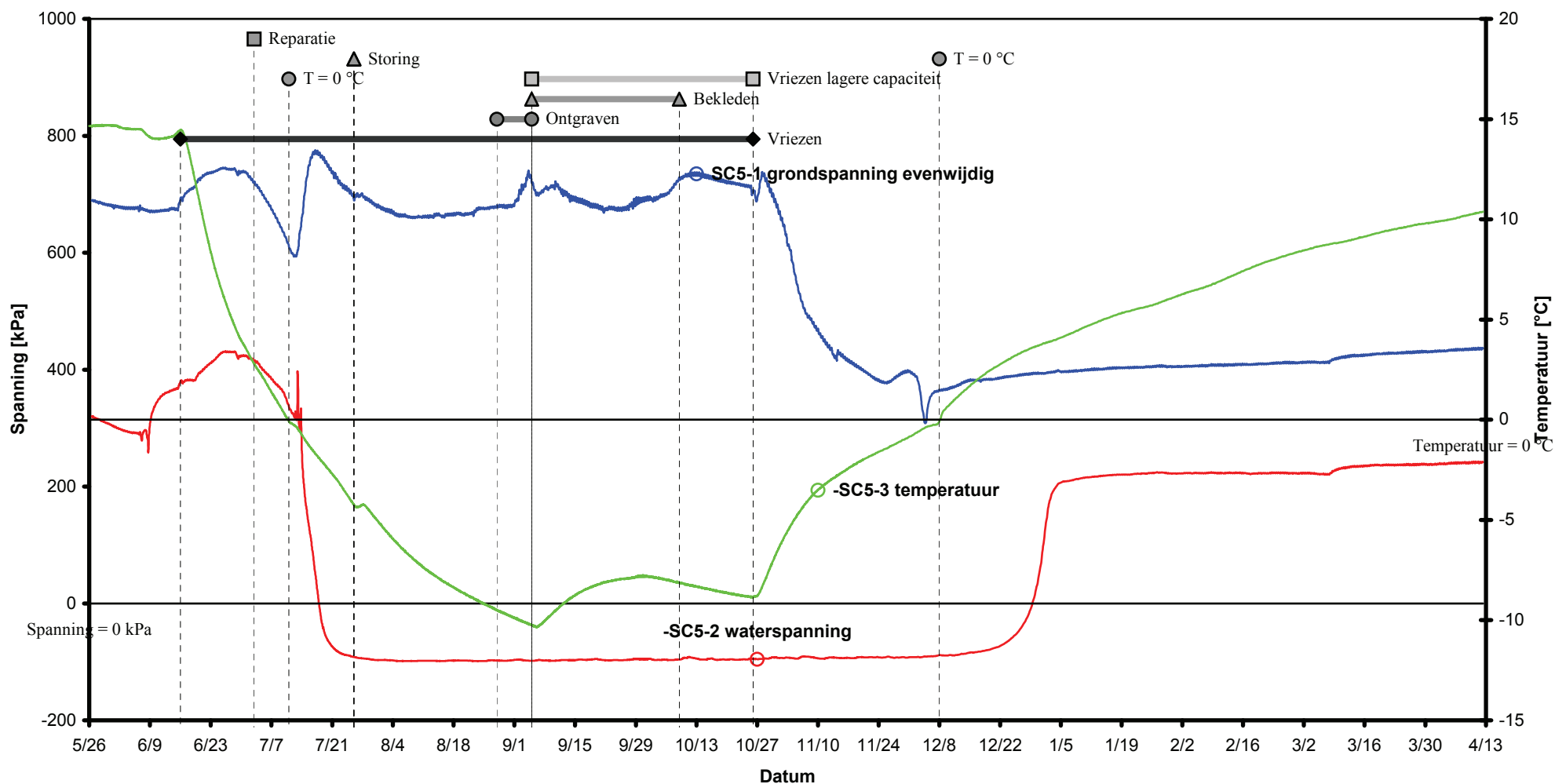
Stress monitoring station 4 (SM4) » Absolute grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum



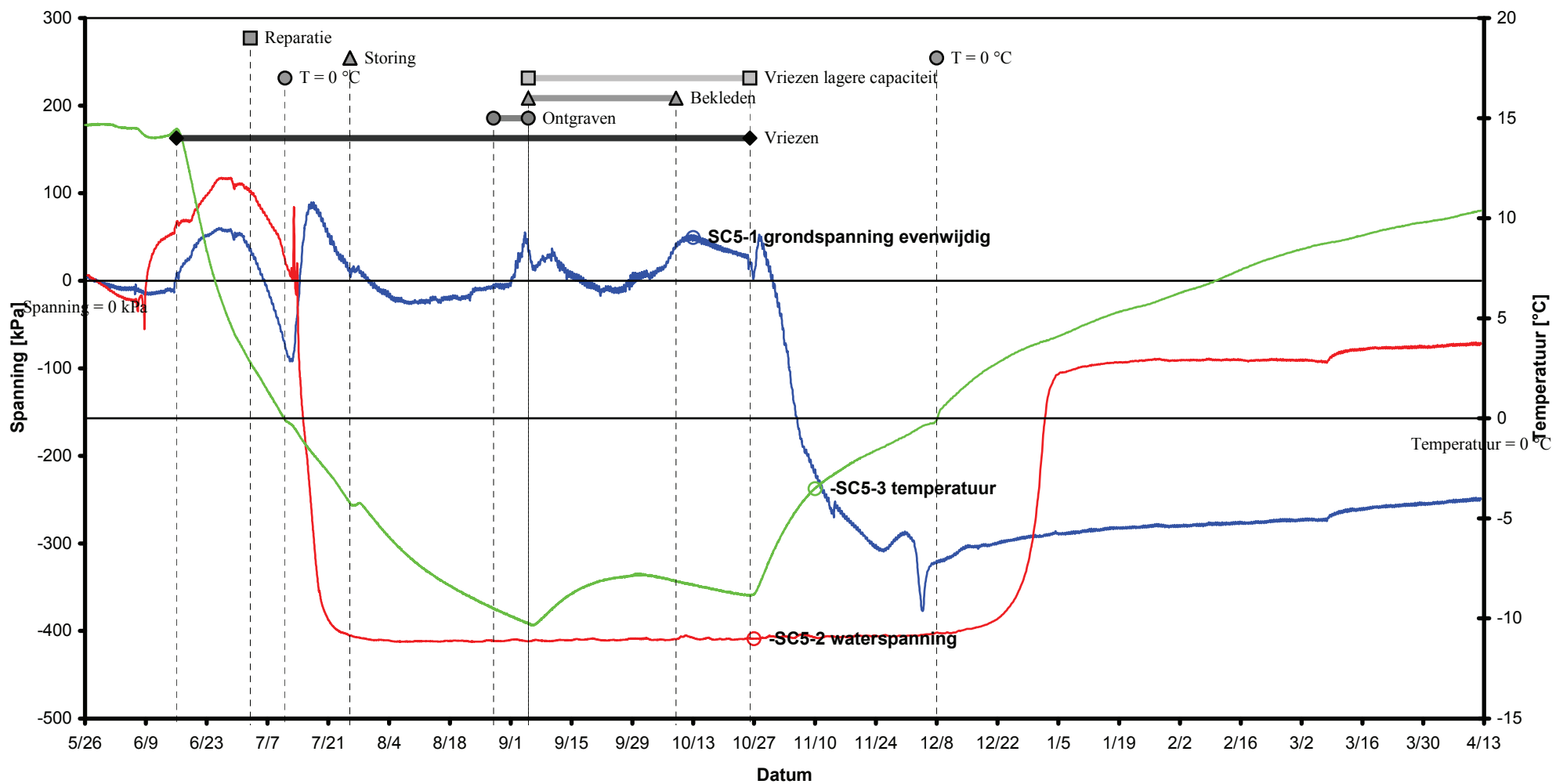
Stress monitoring station 4 (SM4) » Relatieve grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum



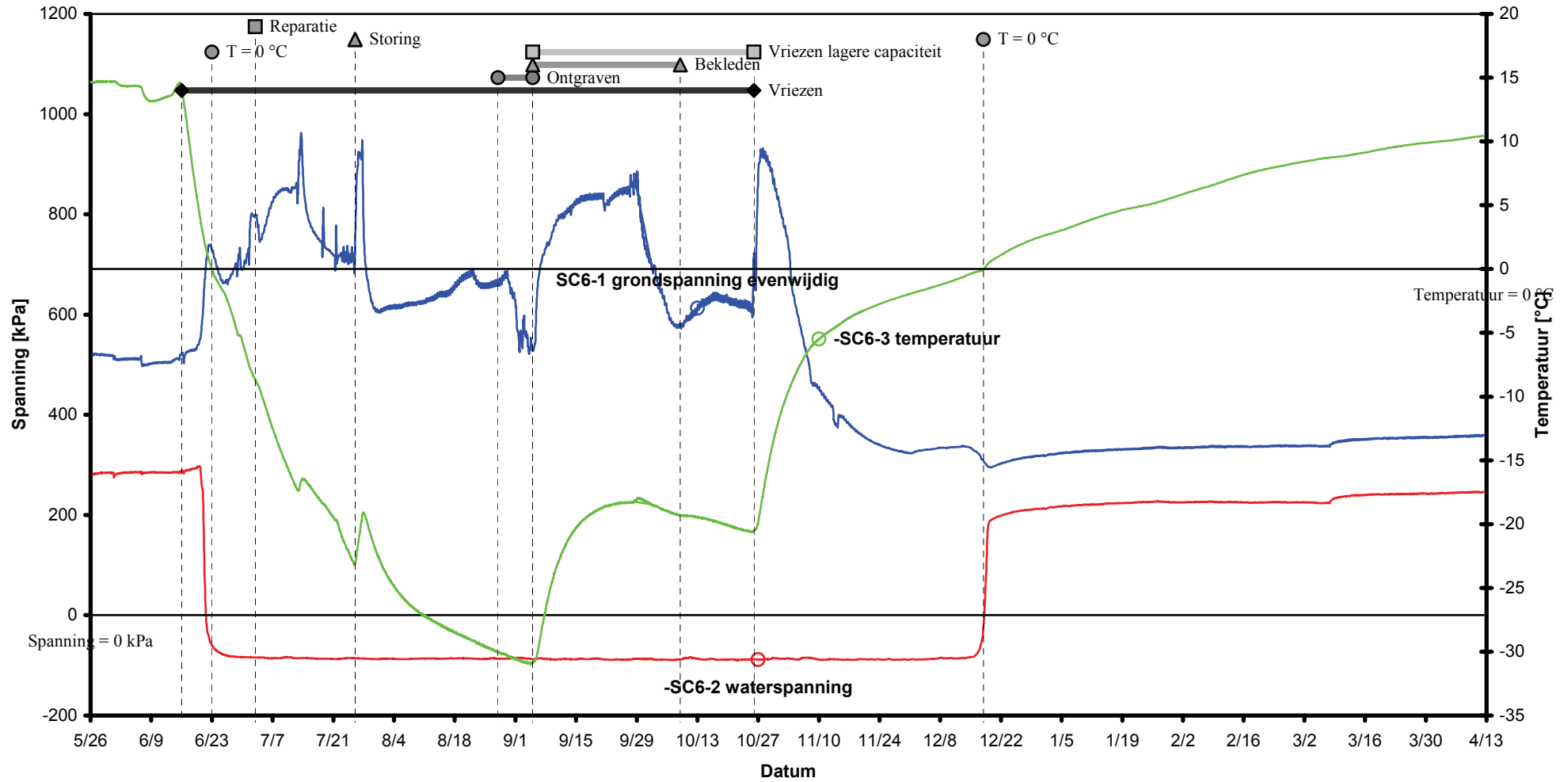
Spade cel 5 (SC5) » Absolute grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum



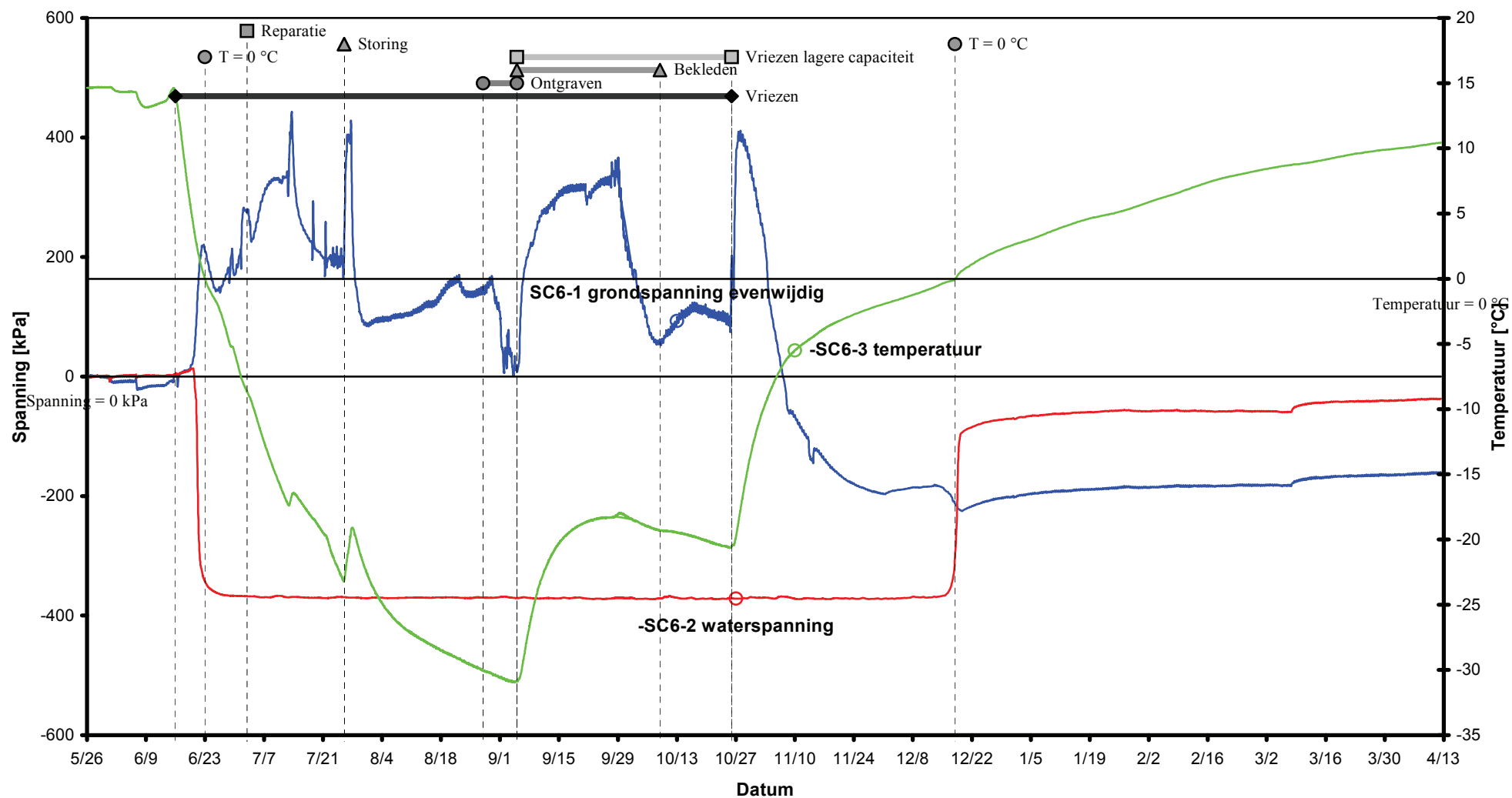
Spade cel 5 (SC5) » Relatieve grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum



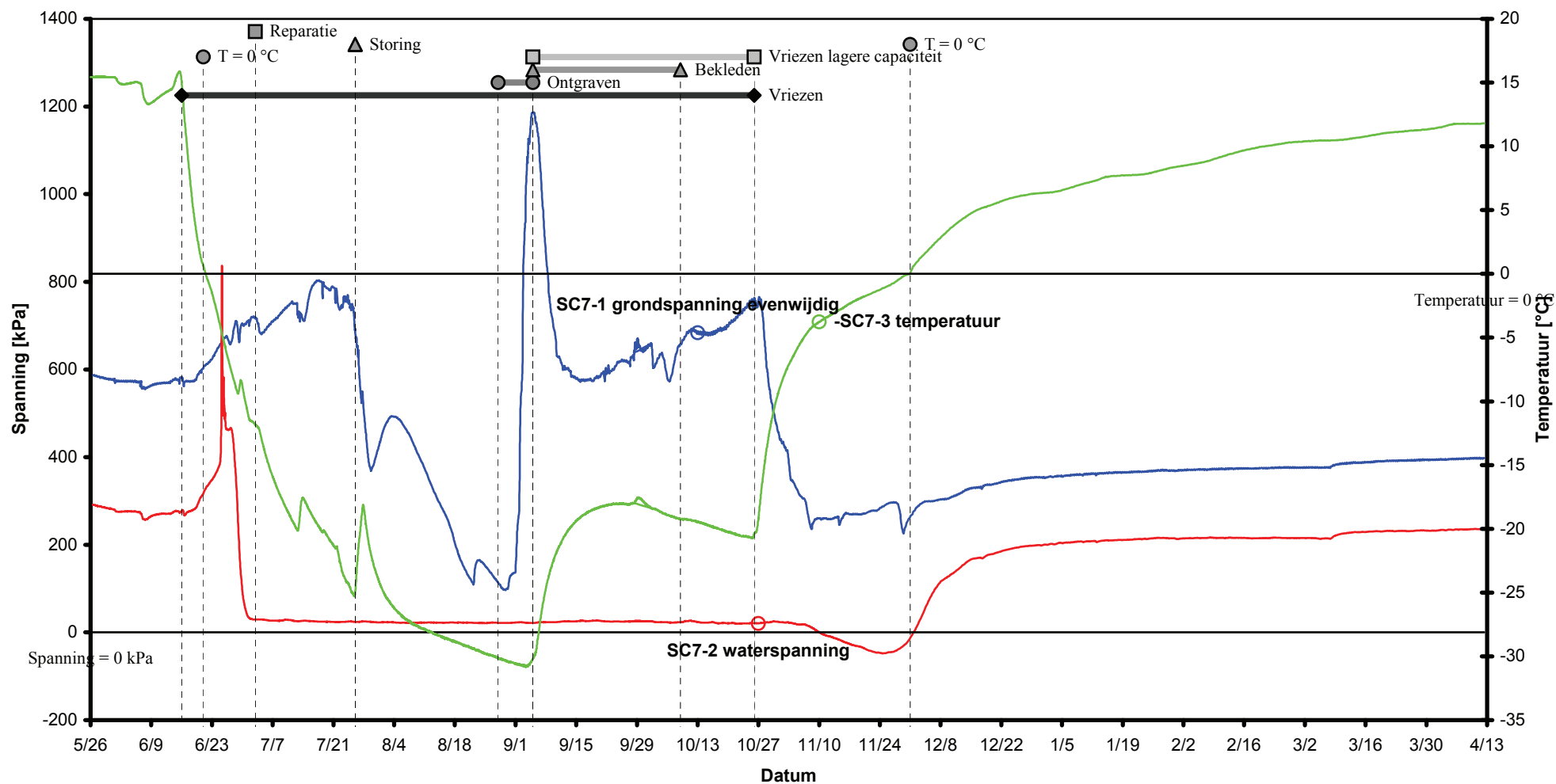
Spade cel 6 (SC6) » Absolute grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum



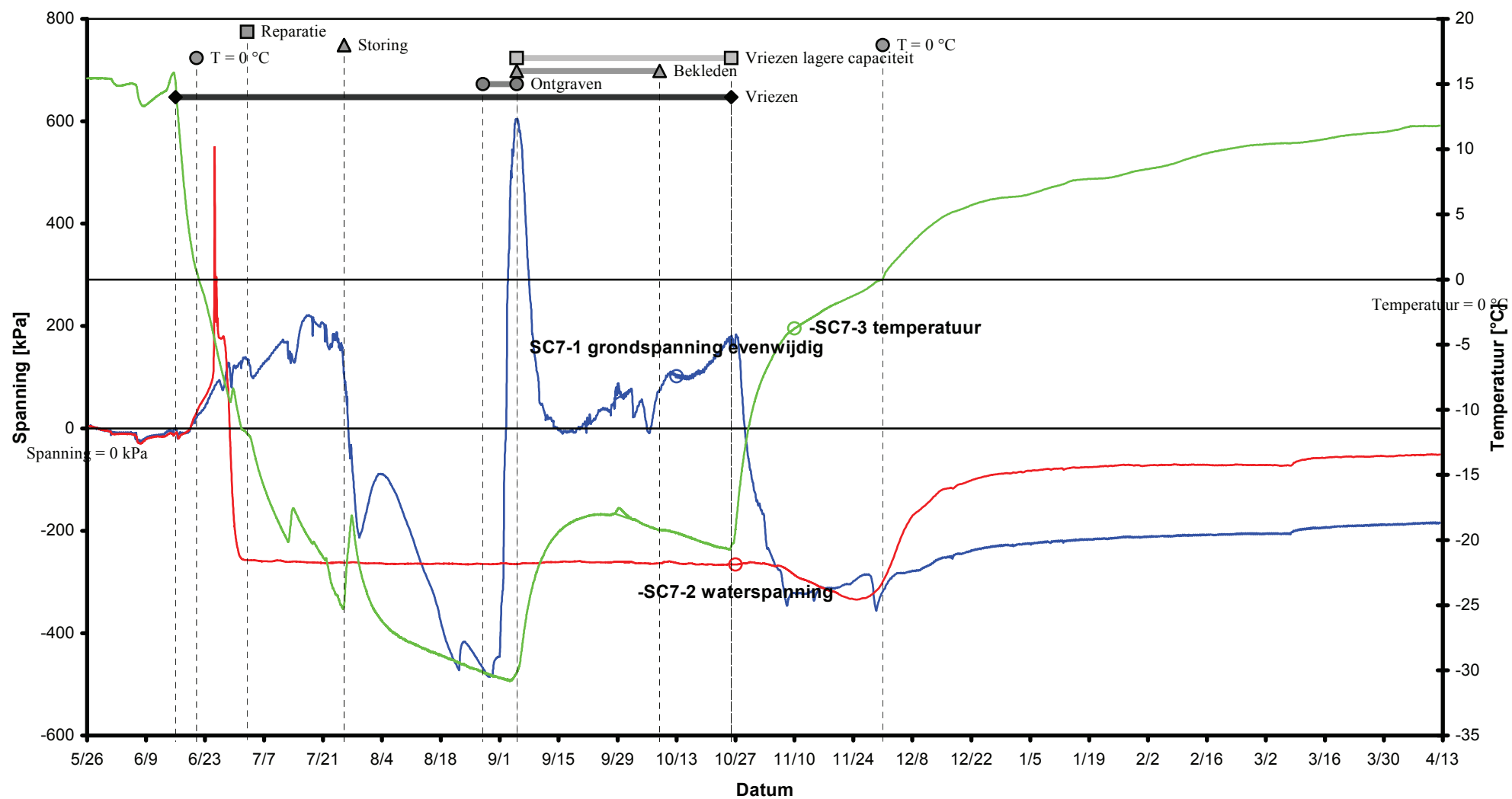
Spade cel 6 (SC6) » Relatieve grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum



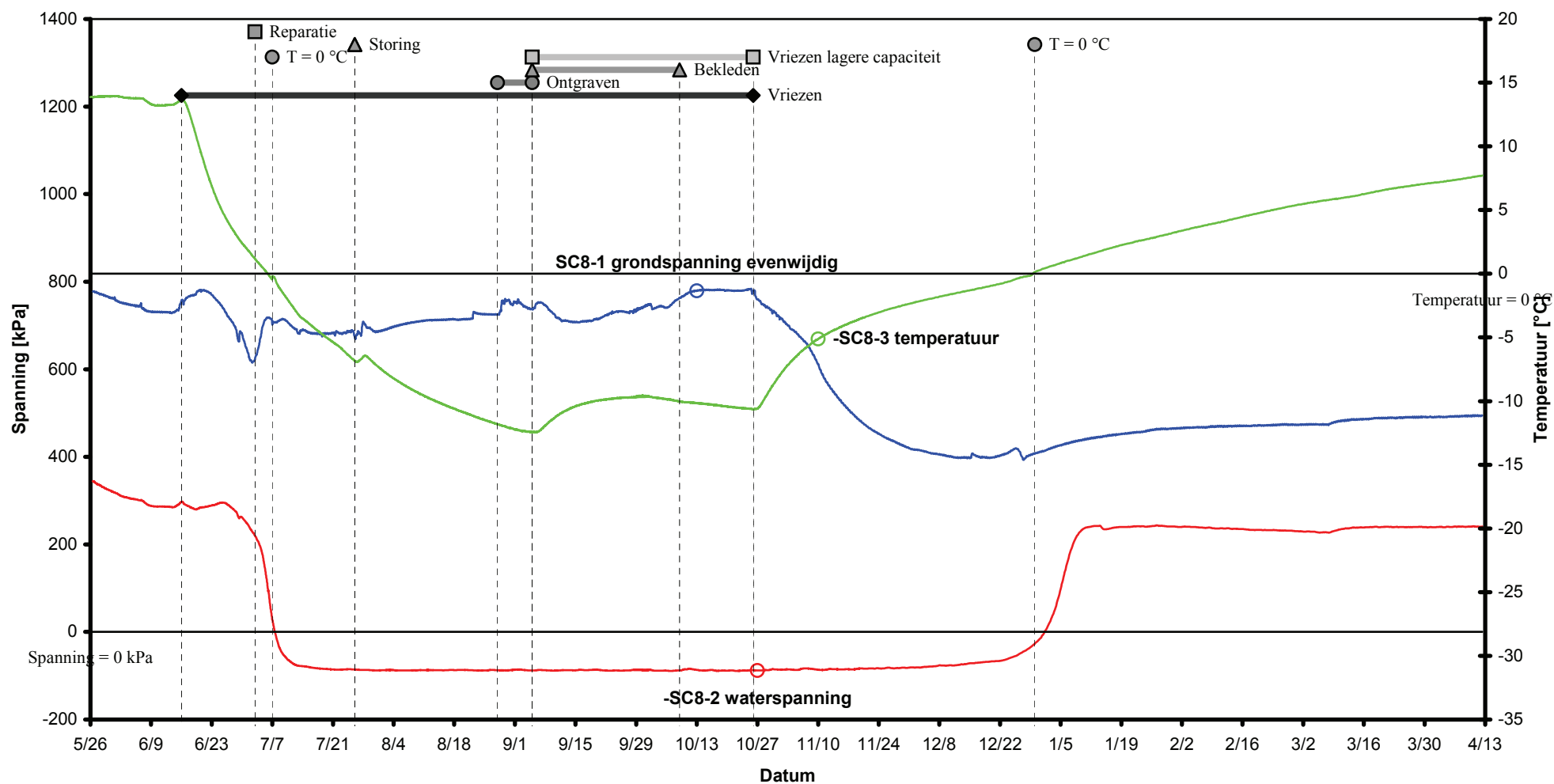
Spade cel 7 (SC7) » Absolute grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum



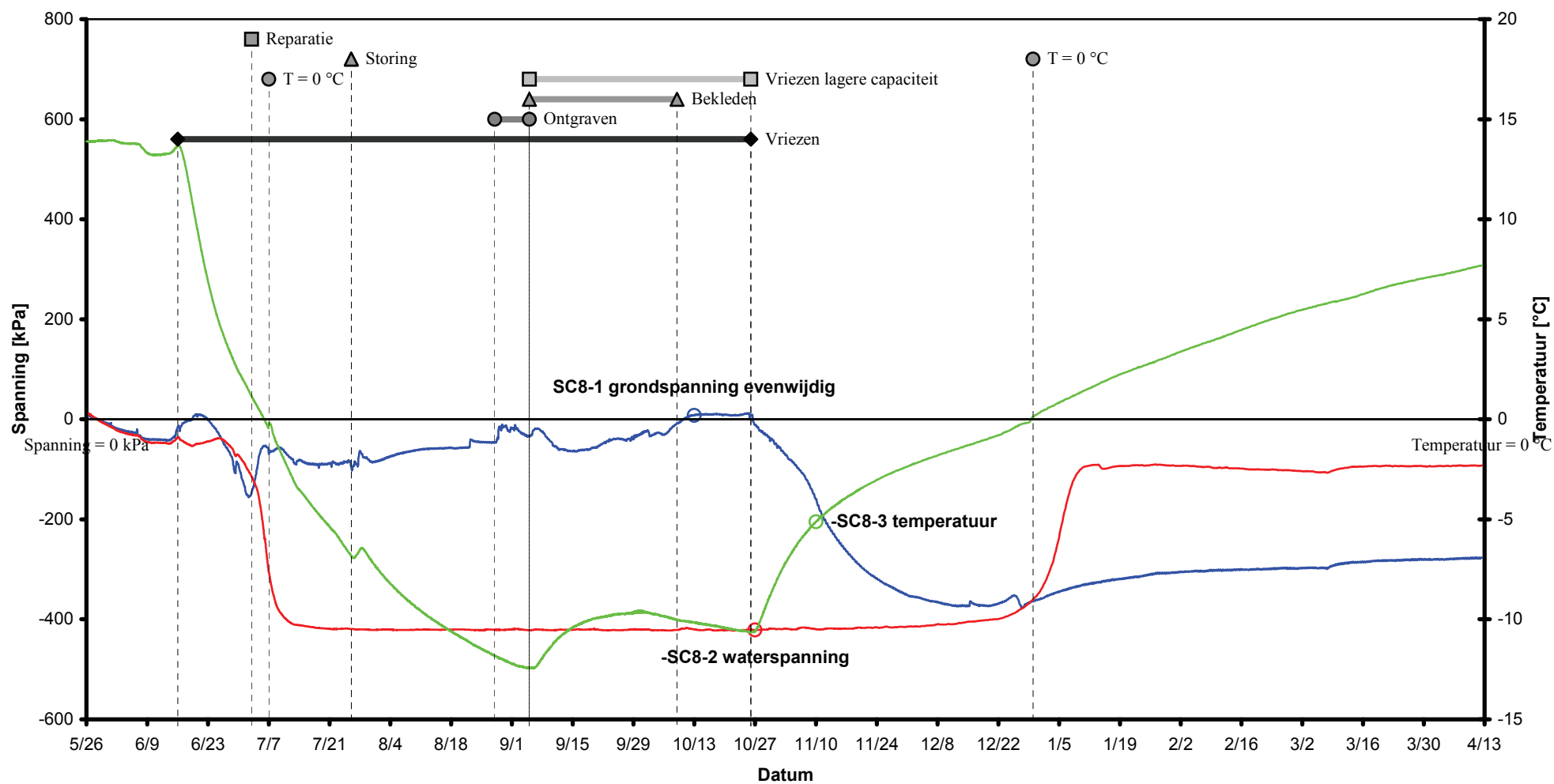
Spade cel 7 (SC7) » Relatieve grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum

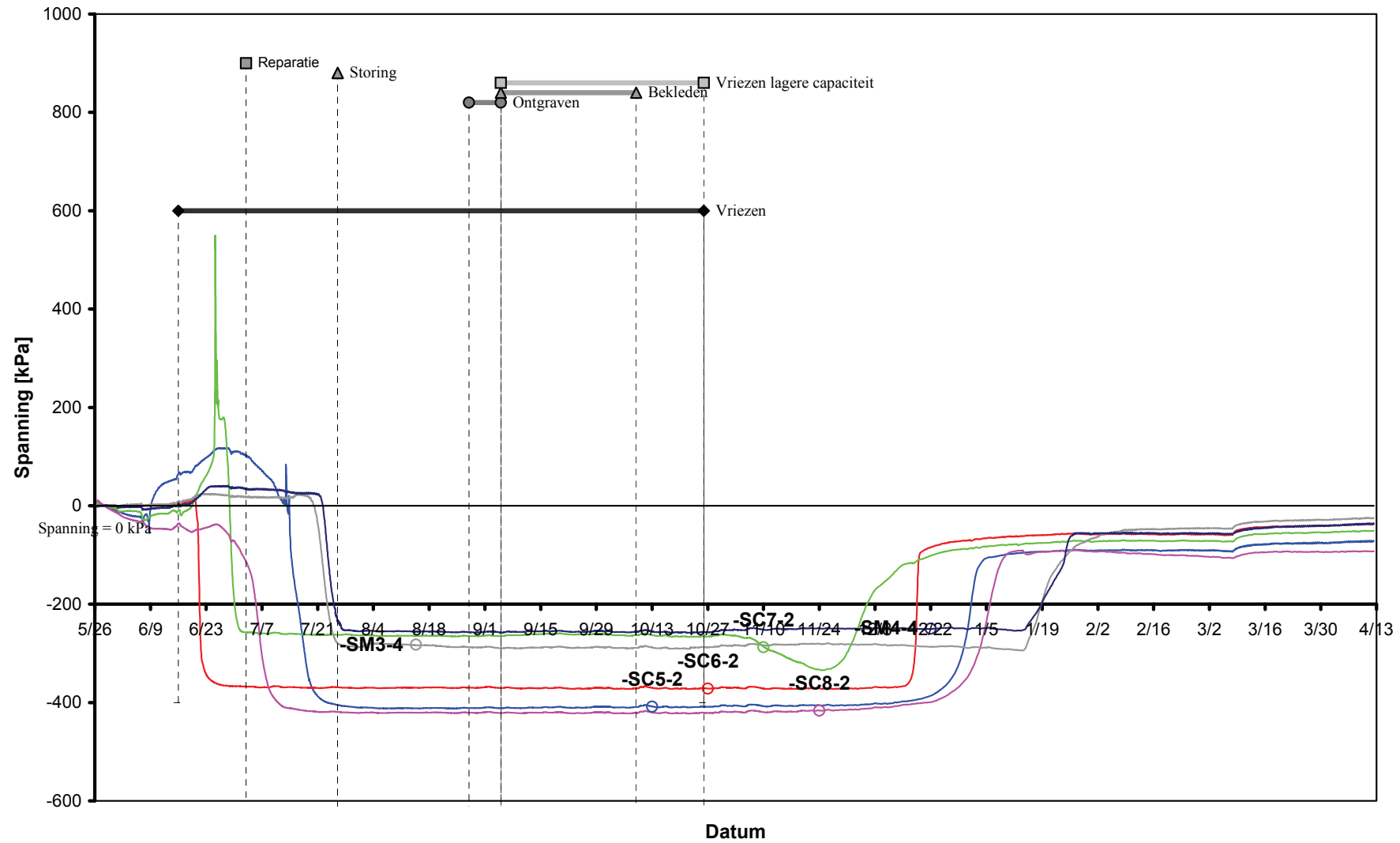


Spade cel 8 (SC8) » Absolute grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum

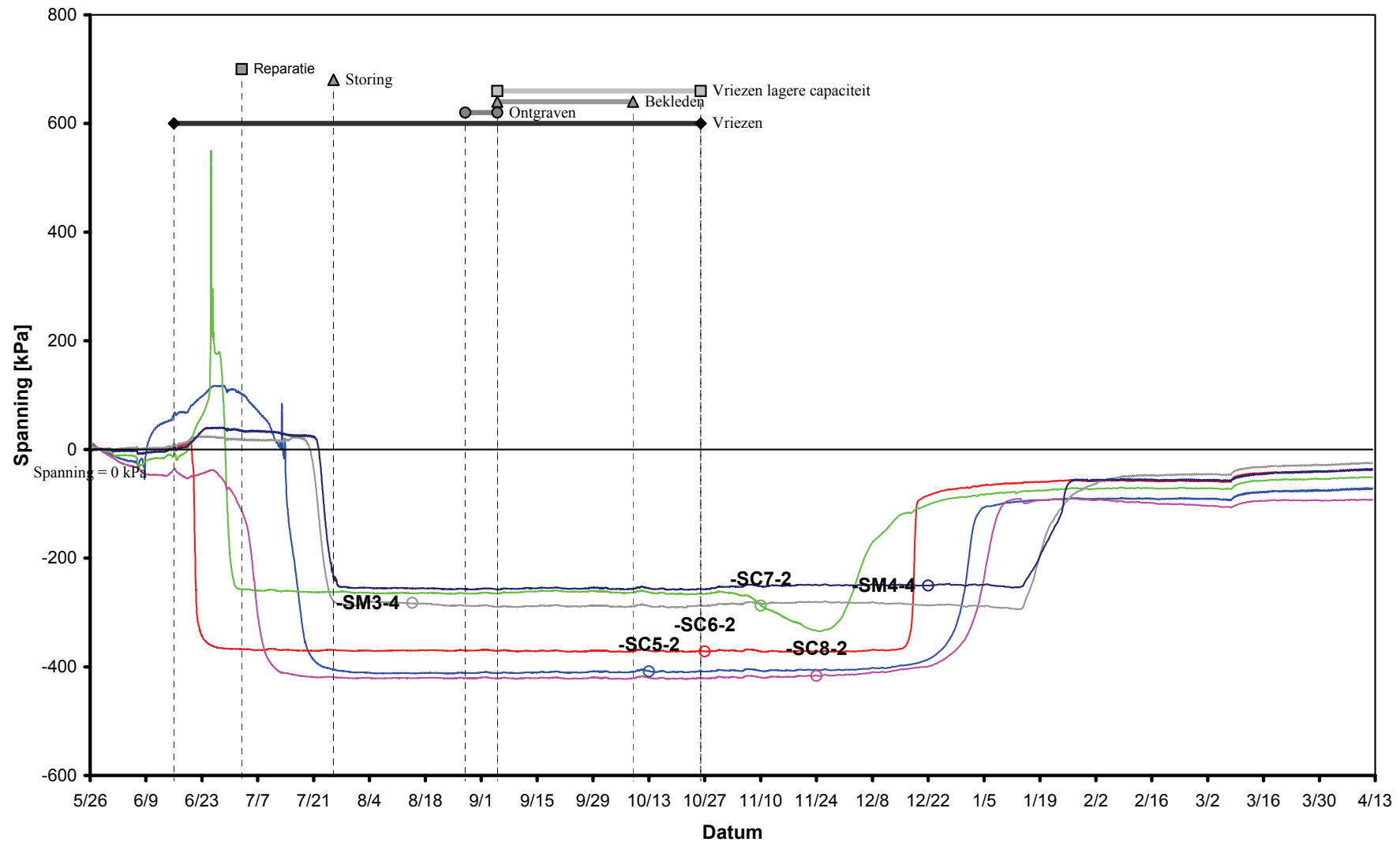


Spade cel 8 (SC8) » Relatieve grond- en waterspanning versus Temperatuur en Datum



BILAGE L8-A

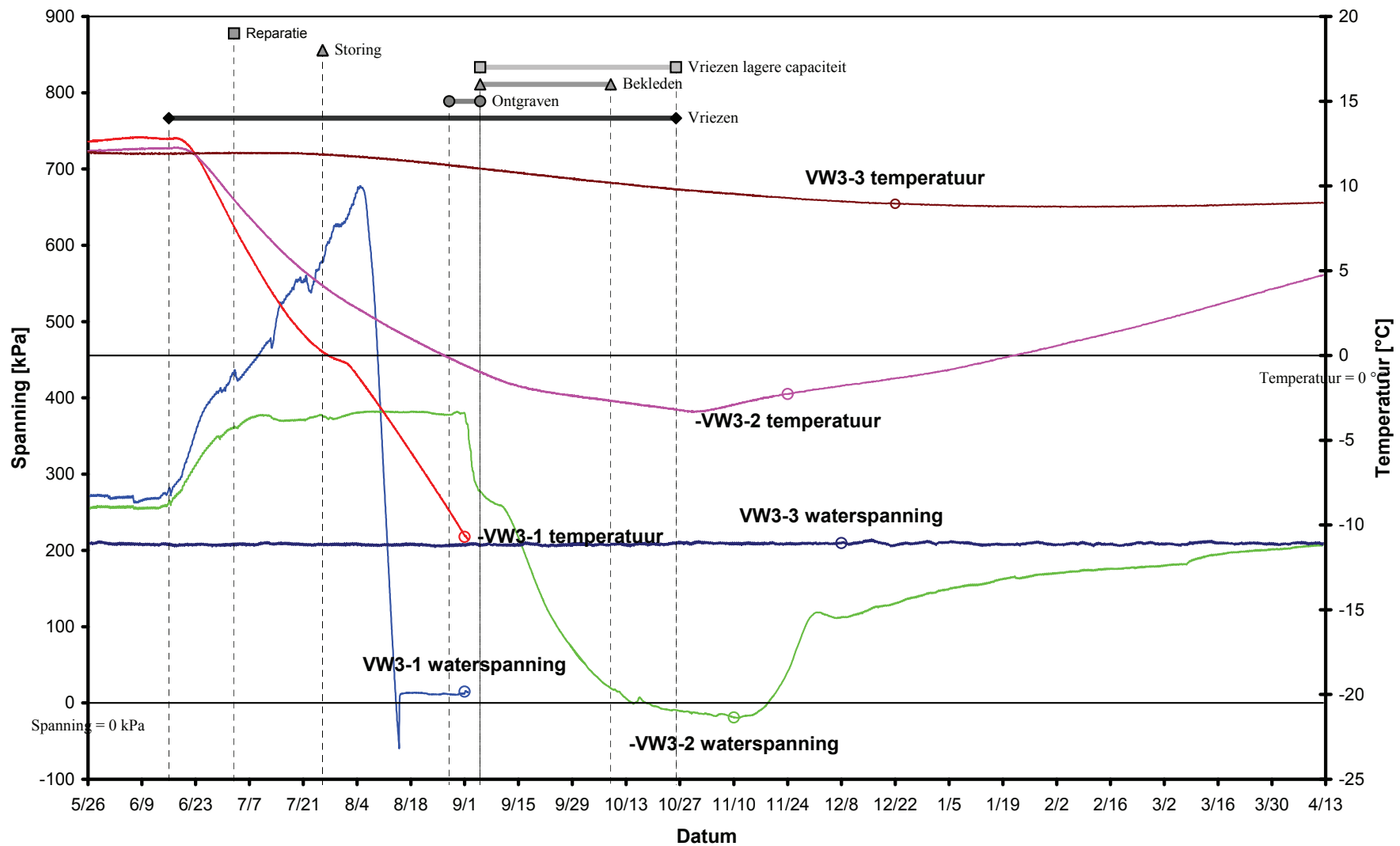
Spade cellen (SC5-SC8) en stress monitoring stations (SM3 en SM4) » Relatieve waterspanningen versus Datum



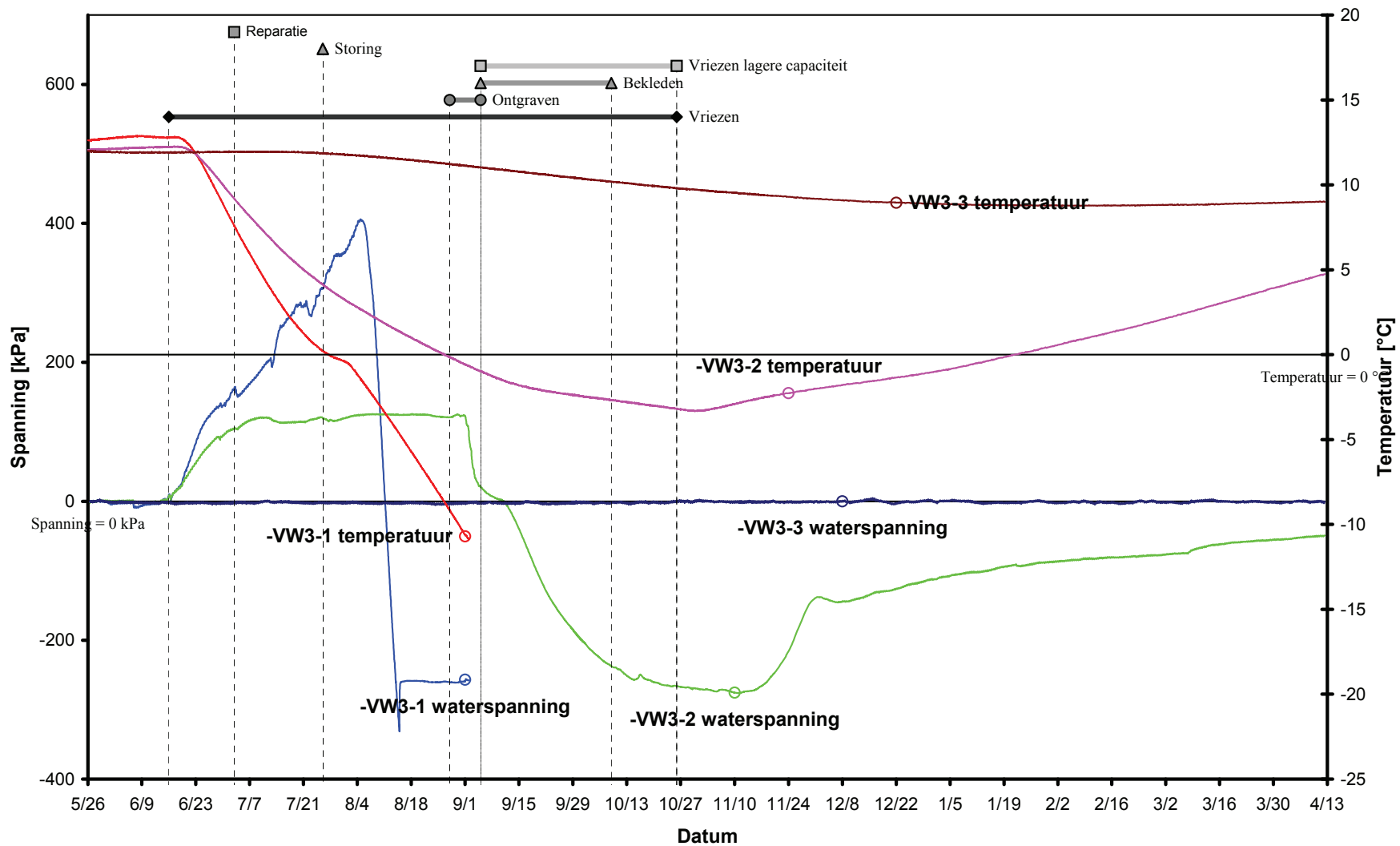
BIJLAGE M

WATERSPANNINGEN VW EN HART DV2

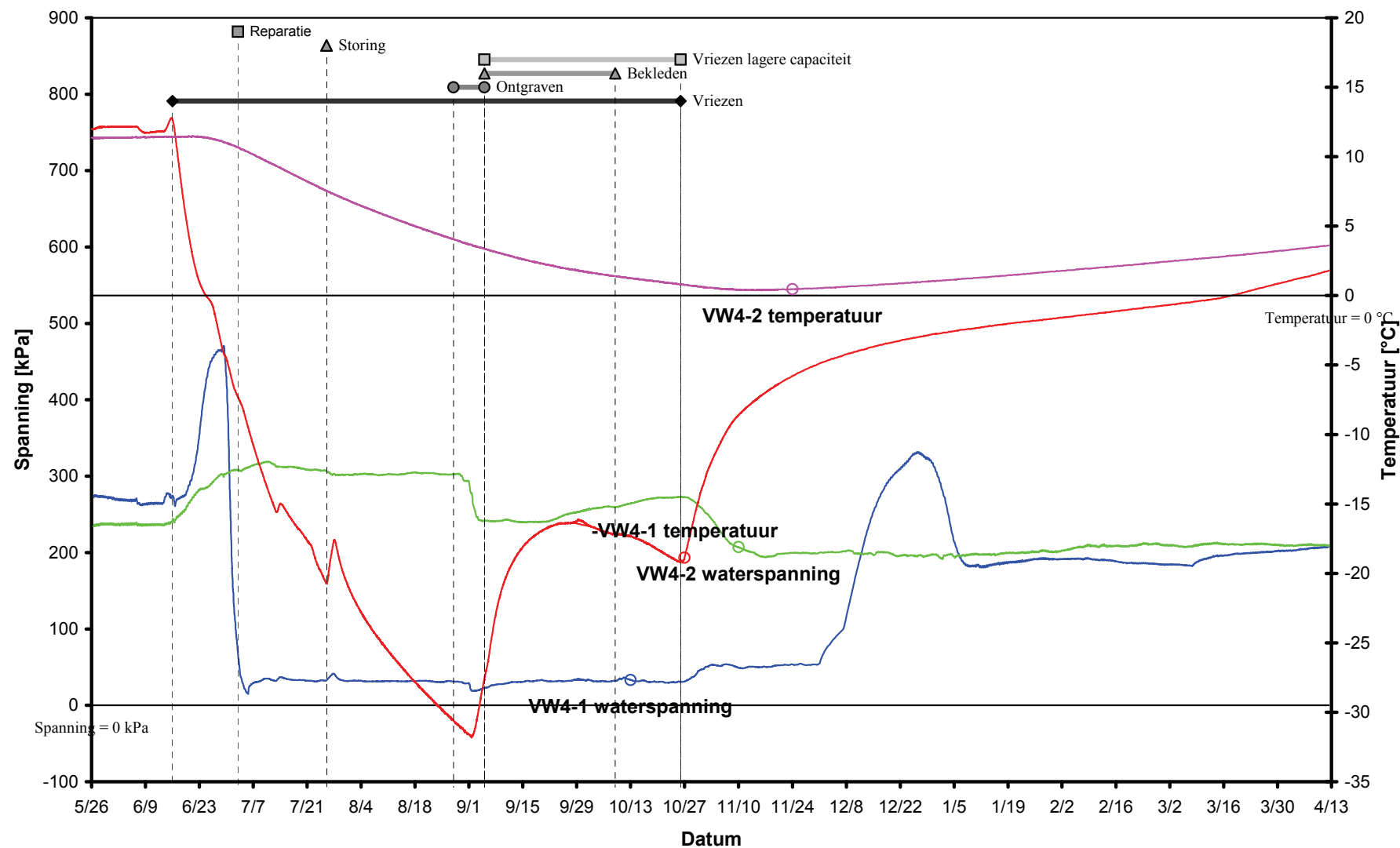
Vibrating wire waterspanningsmeter (VW3) » Absolute waterspanning versus Temperatuur en Datum



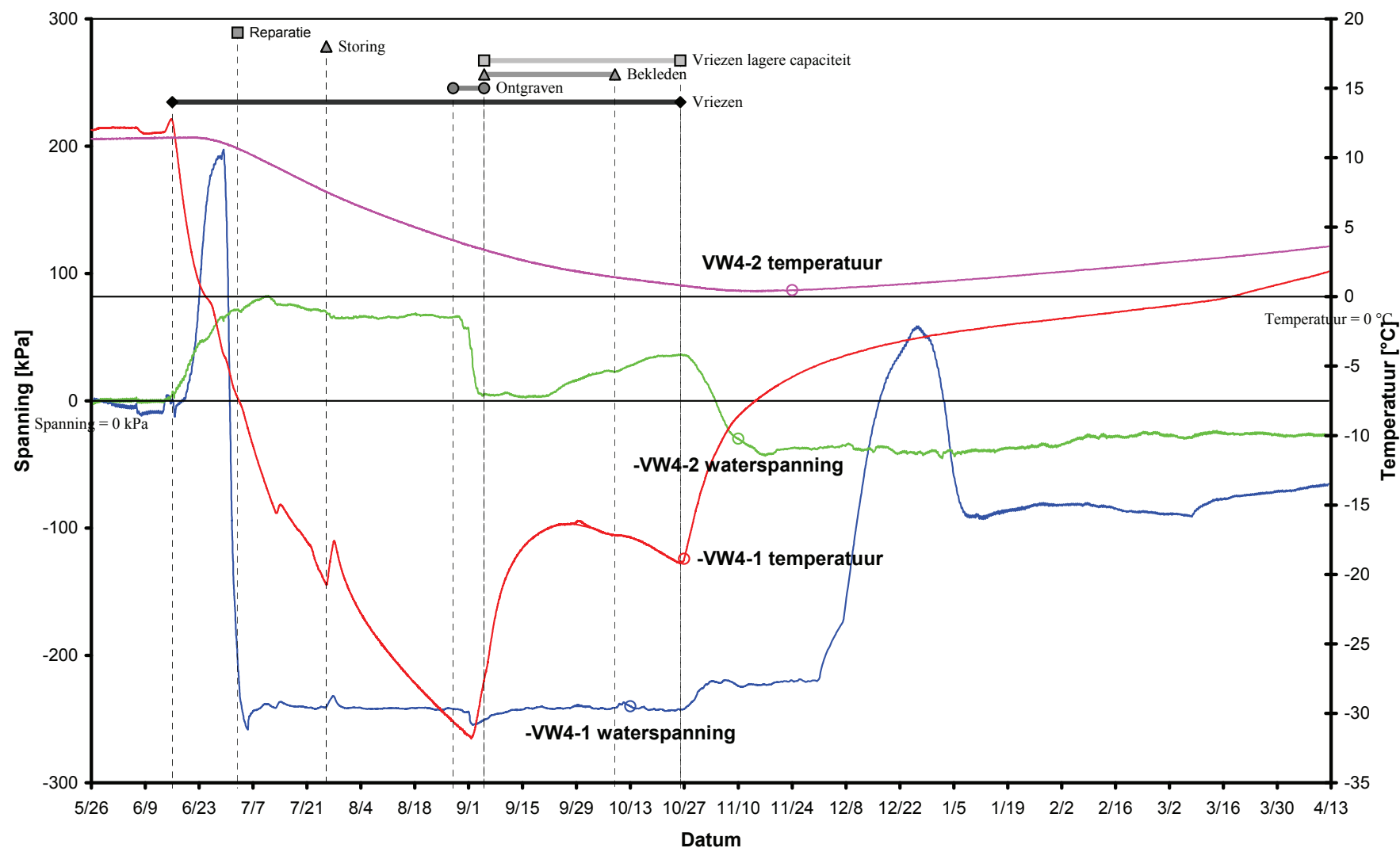
Vibrating wire waterspanningsmeter (VW3) » Relatieve waterspanning versus Temperatuur en Datum



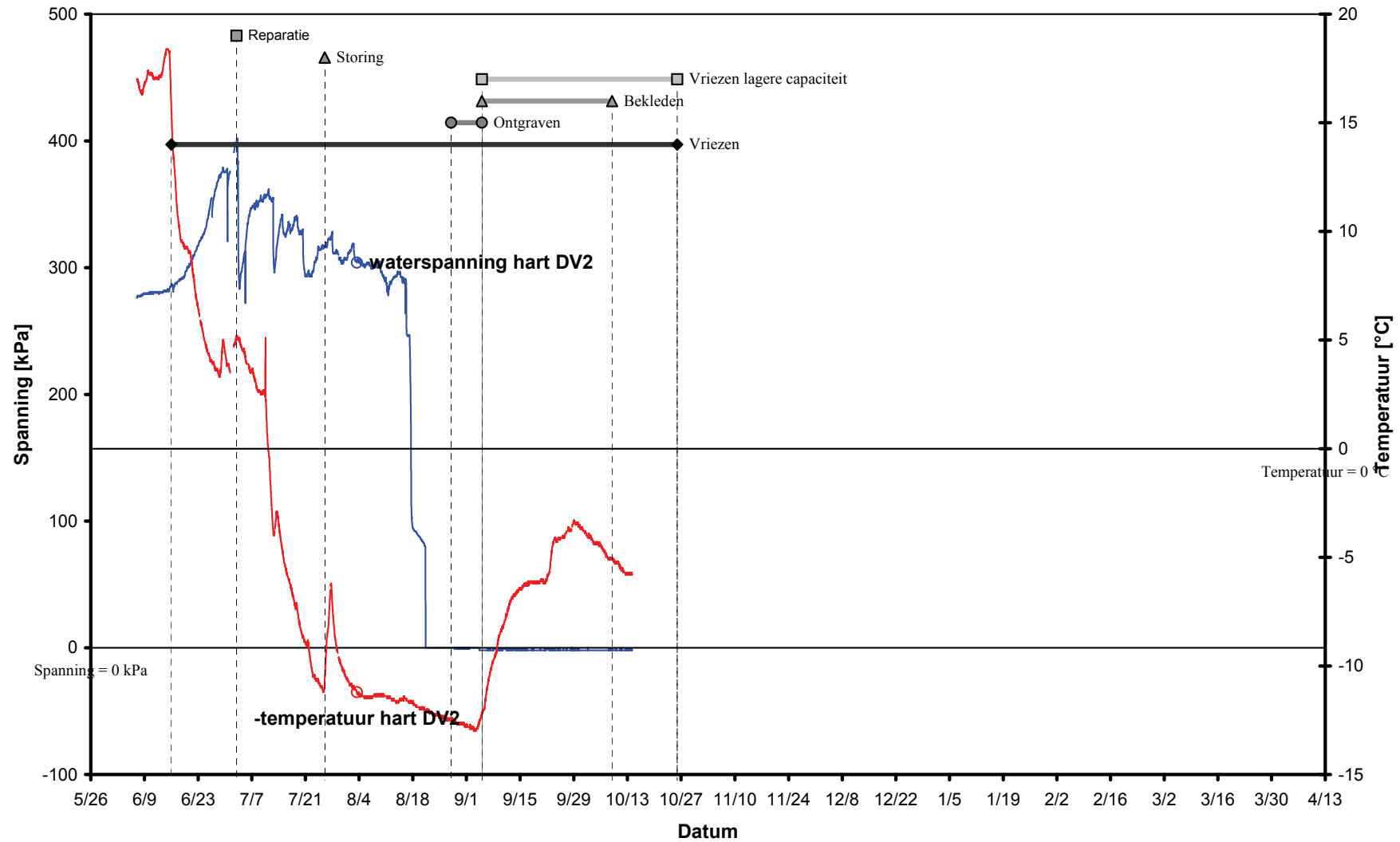
Vibrating wire waterspanningsmeter (VW4) » Absolute waterspanning versus Temperatuur en Datum



Vibrating wire waterspanningsmeter (VW4) » Relatieve waterspanning versus Temperatuur en Datum



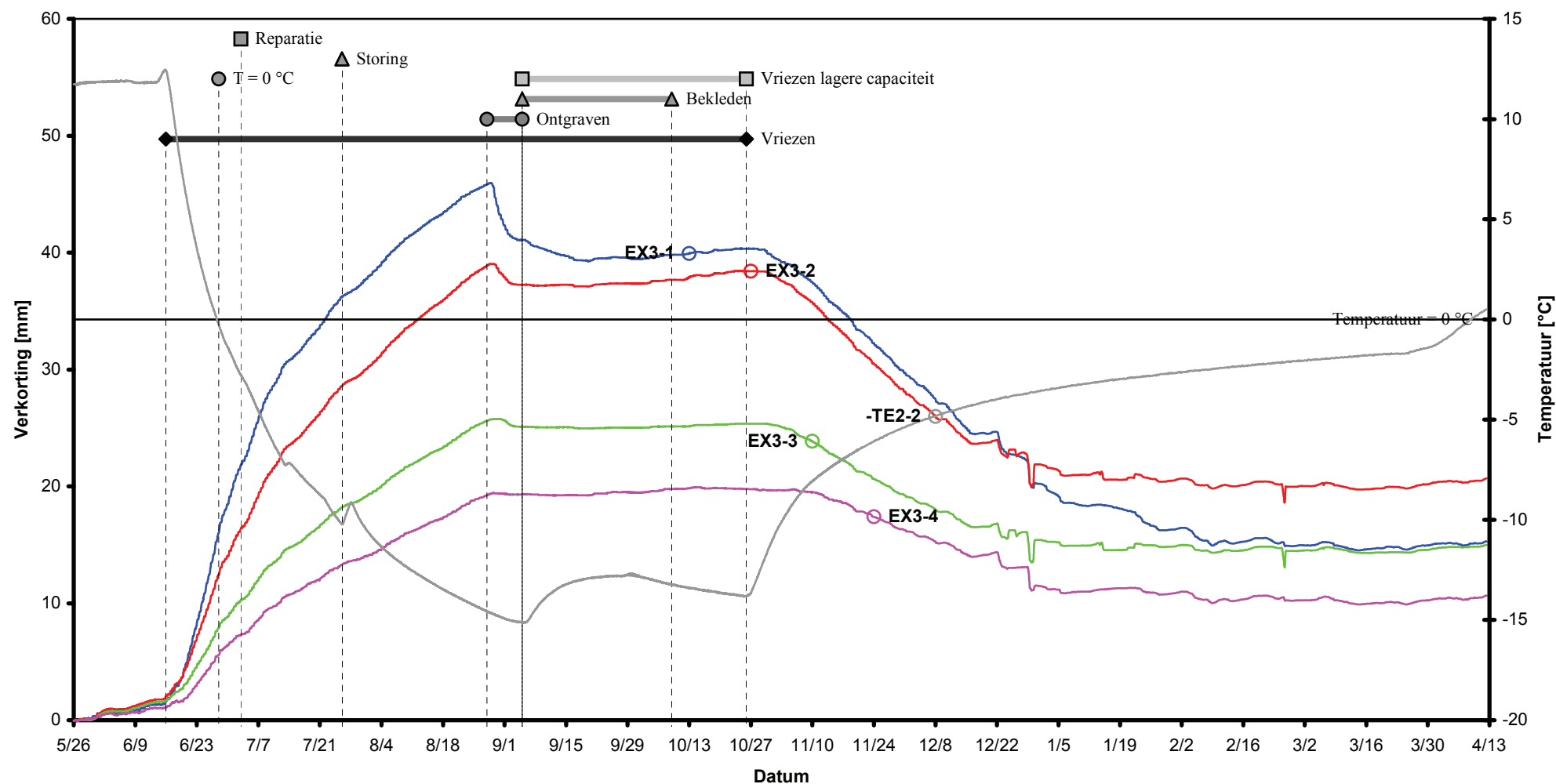
Waterspanningsmeter hart dwarsverbinding 2 » Absolute waterspanning versus Temperatuur en Datum



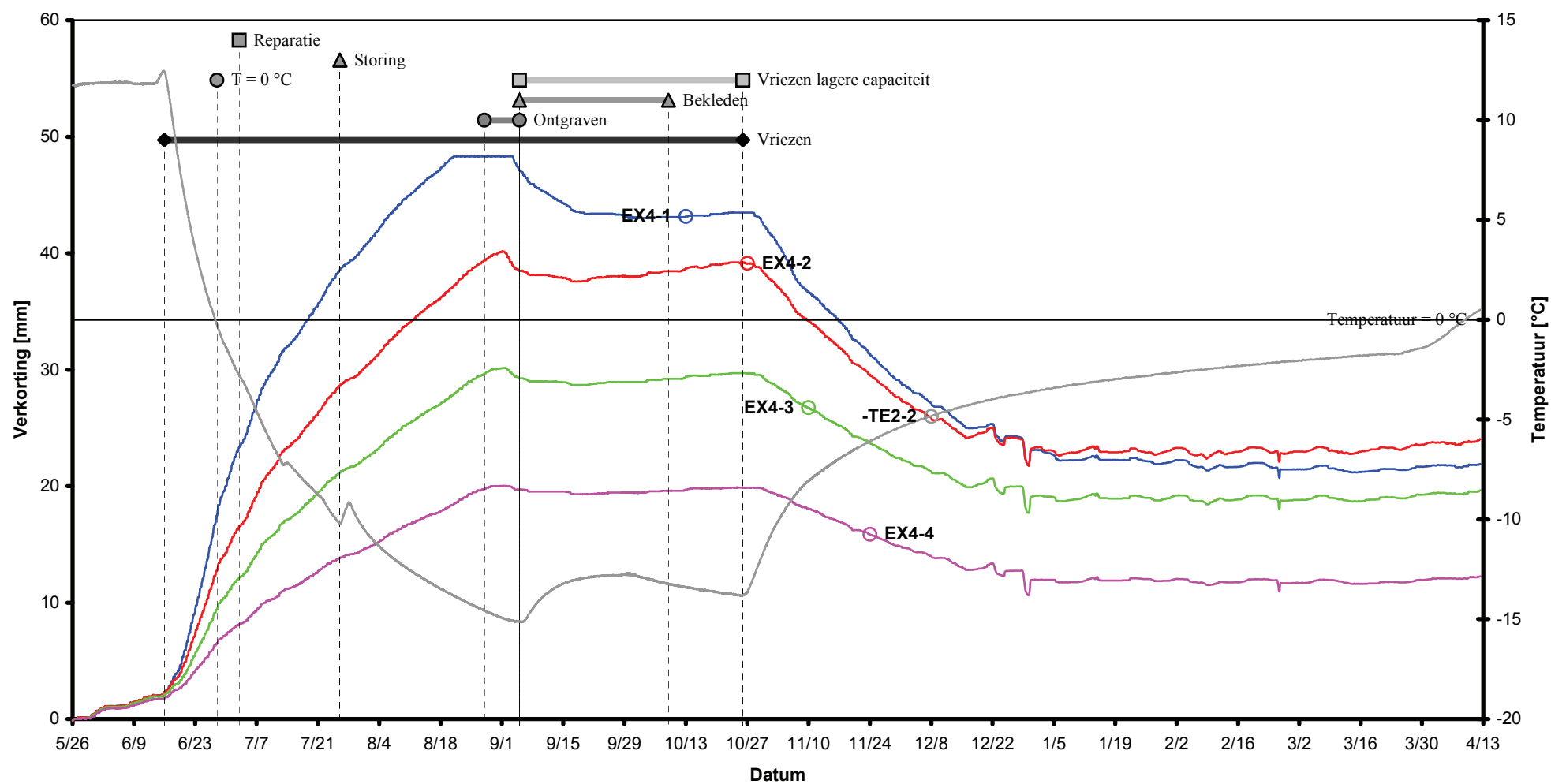
BIJLAGE N

DEFORMATIE EX EN HE BIJ DV2

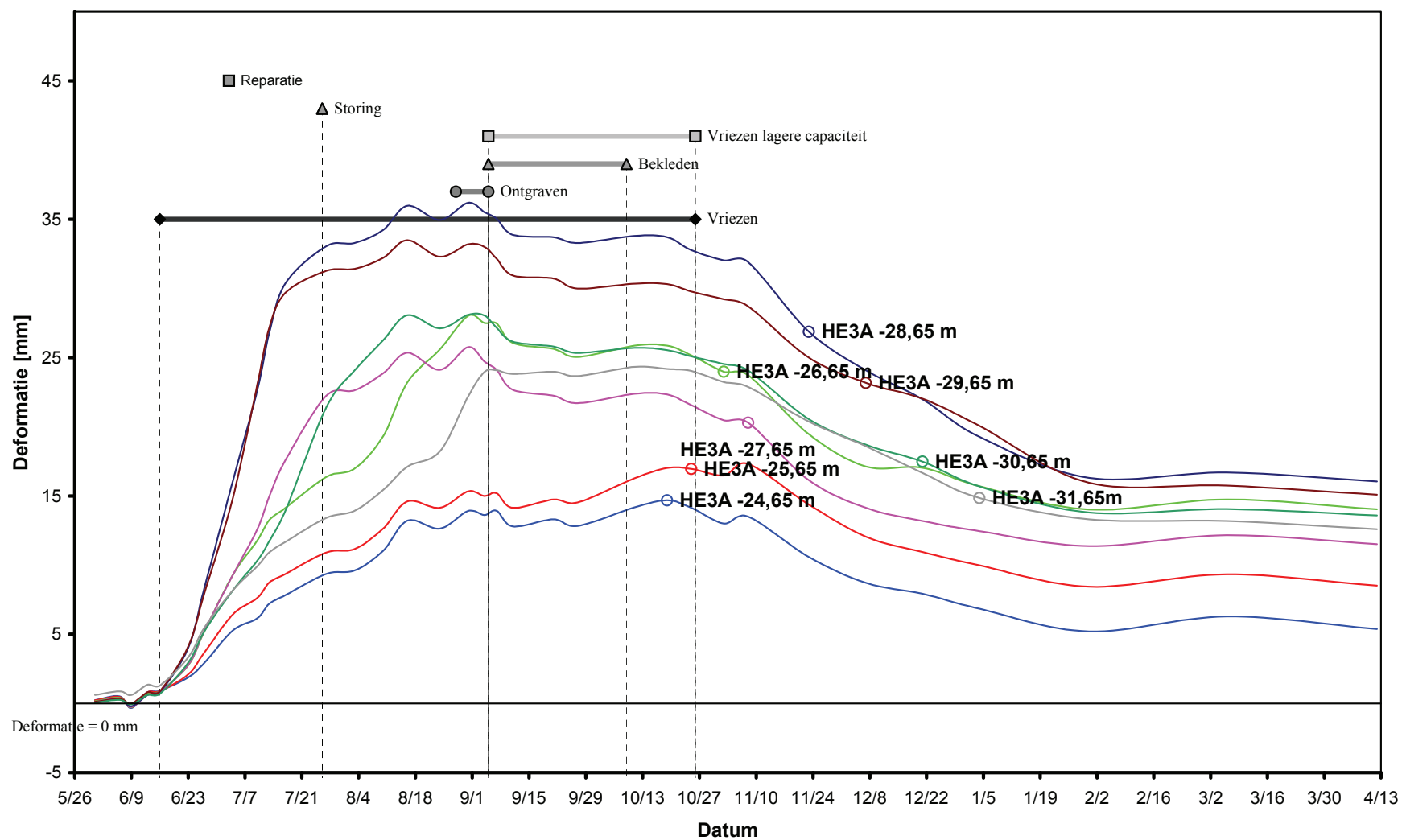
Extensometer 3 (EX3) » Absolute verticale deformatie versus Temperatuur en Datum



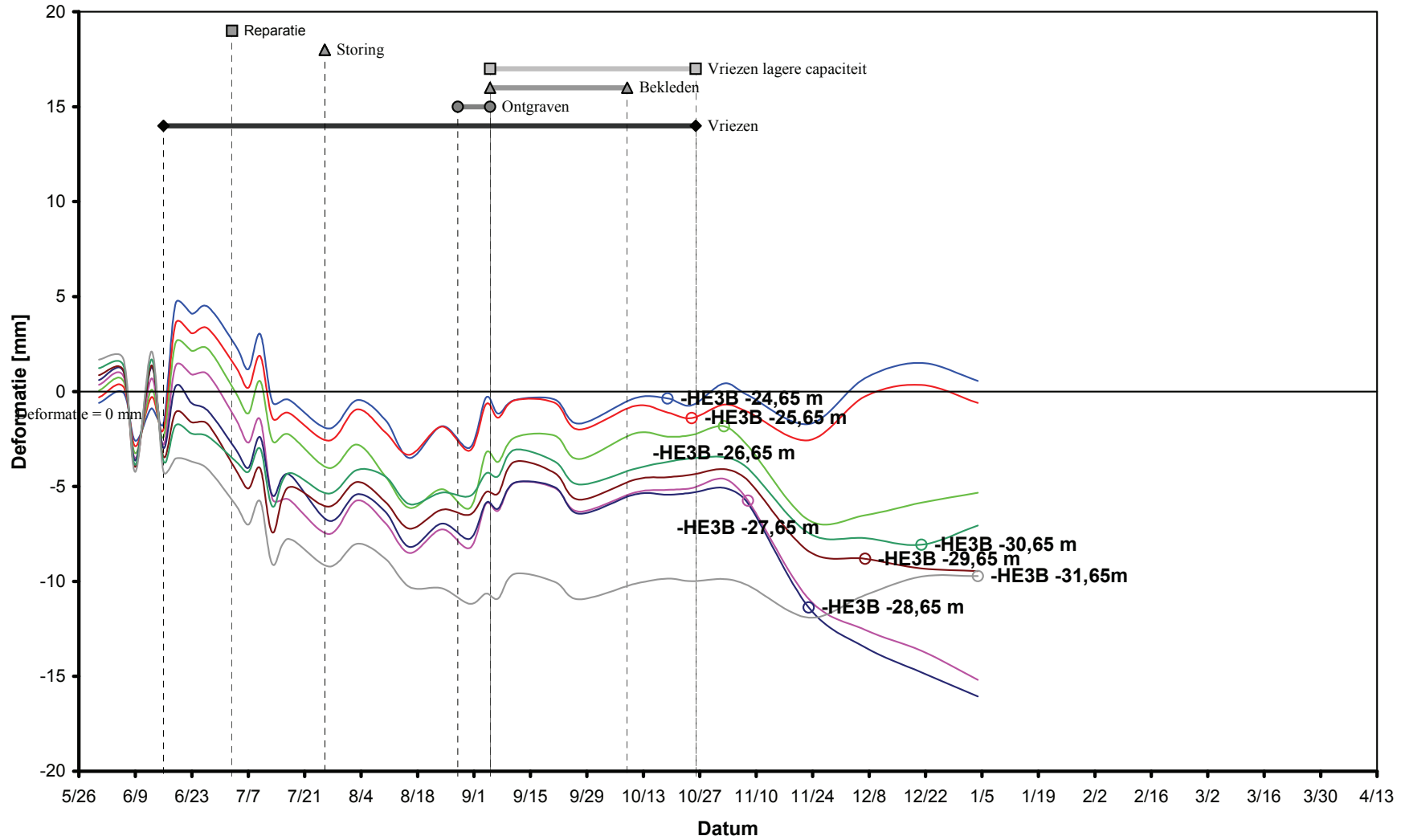
Extensometer 4 (EX4) » Absolute verticale deformatie versus Temperatuur en Datum



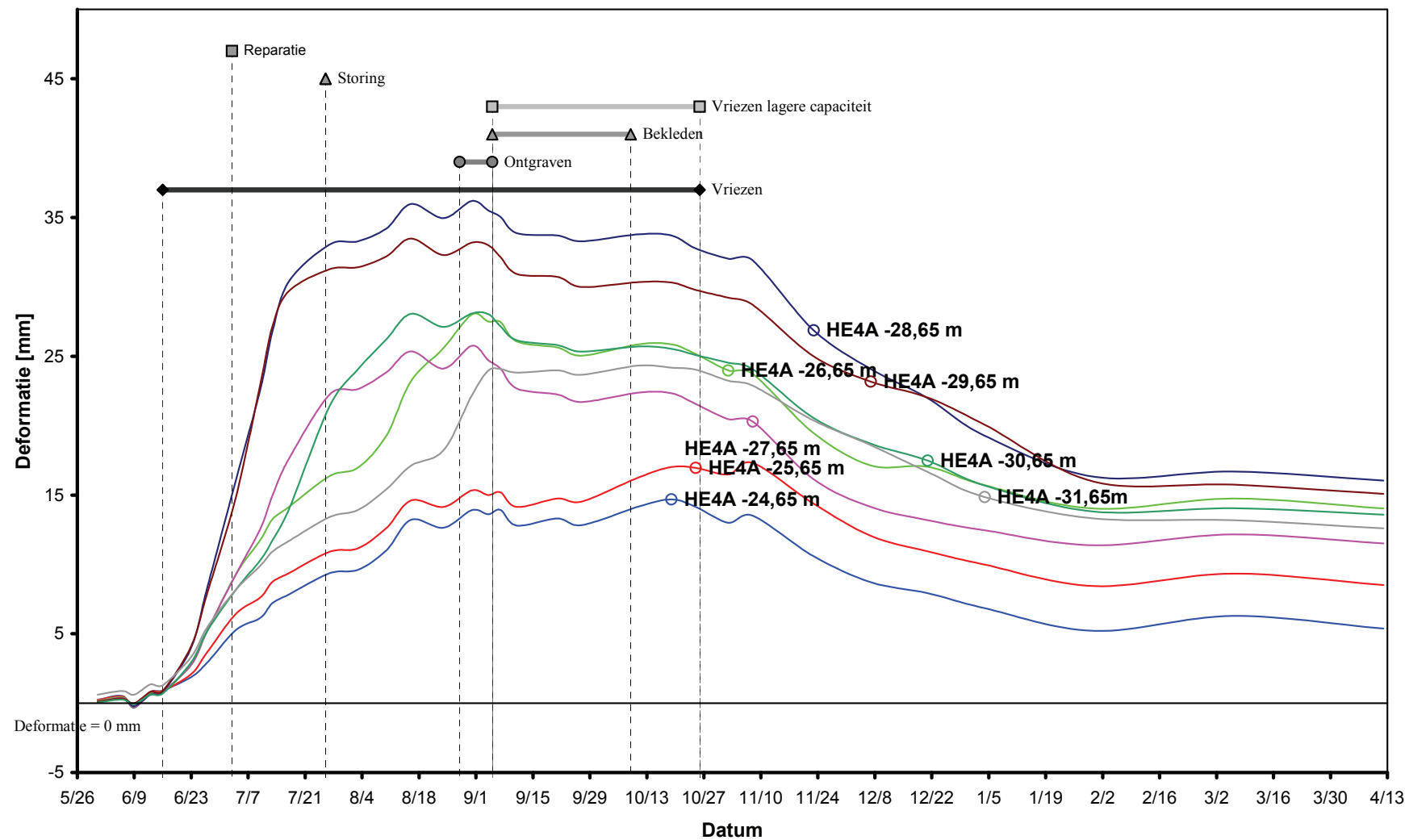
BILAGE N3



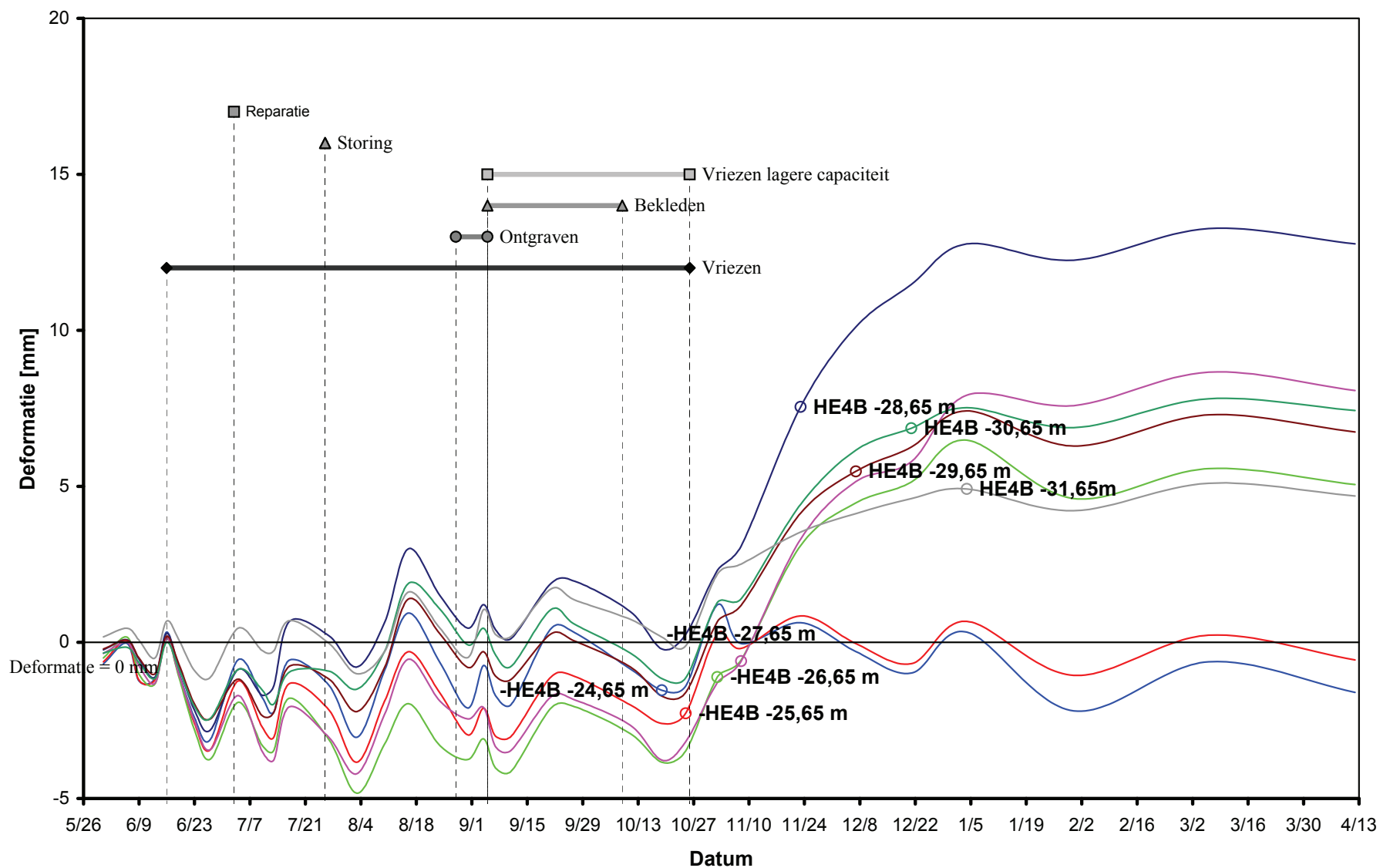
Hellingmeetbuis 3, B richting (HE3B) » Absolute gronddeformatie op dieptes NAP -24 t/m -32 m versus Datum



**Hellingmeetbuis 4, A richting (HE4A) » Absolute gronddeformatie op dieptes NAP -24 t/m -32 m
versus Datum**

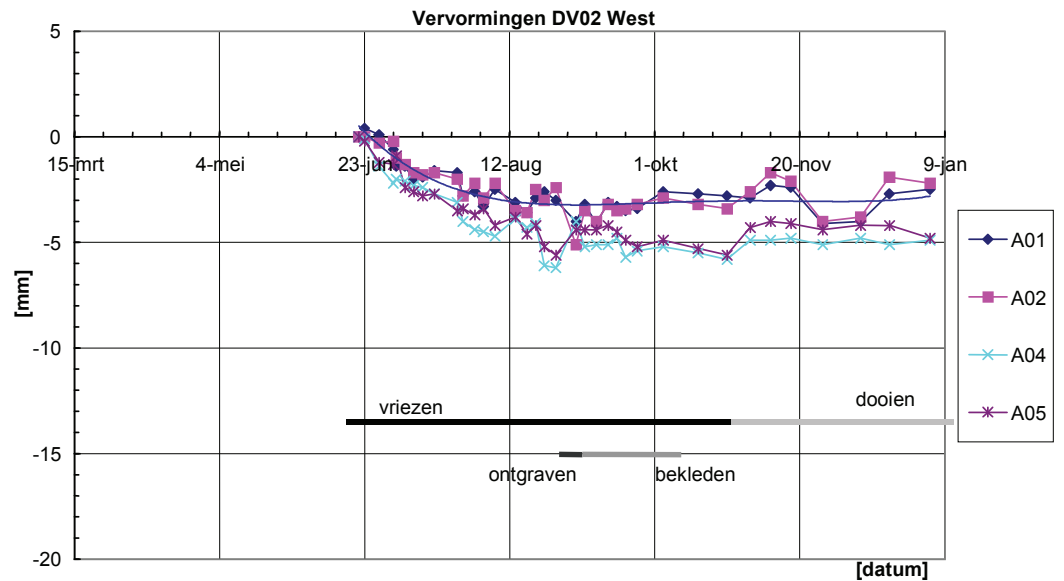


Hellingmeetbuis 4, B richting (HE4B) » Absolute gronddeformatie op dieptes NAP -24 t/m -32 m versus Datum

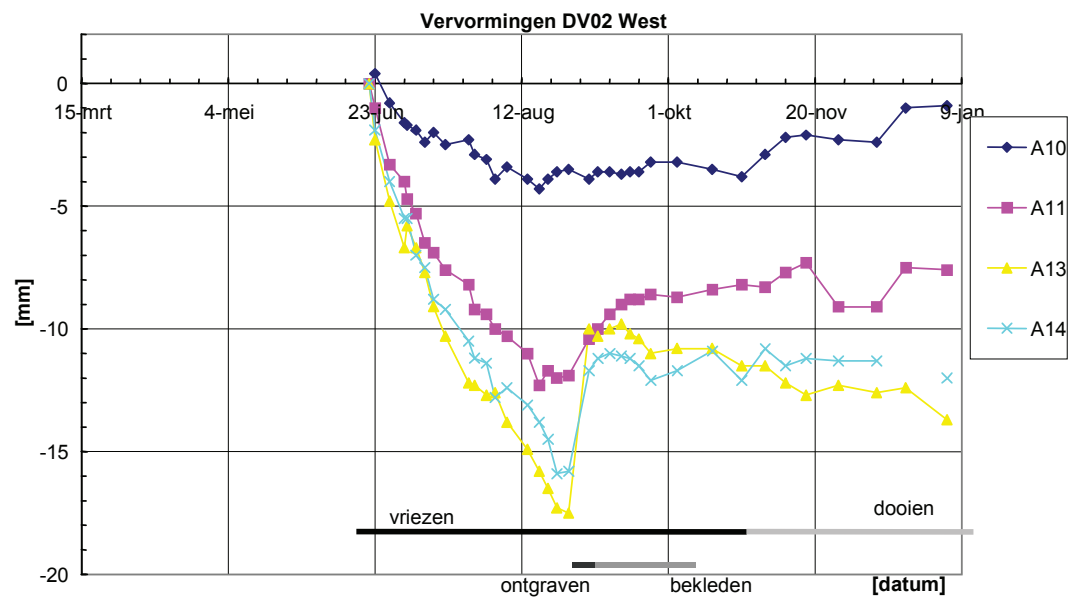


BIJLAGE 0

TIJDGRAFIEKEN VAN VOEGVERPLAATSINGEN (A-PUNTEN) BIJ DV2



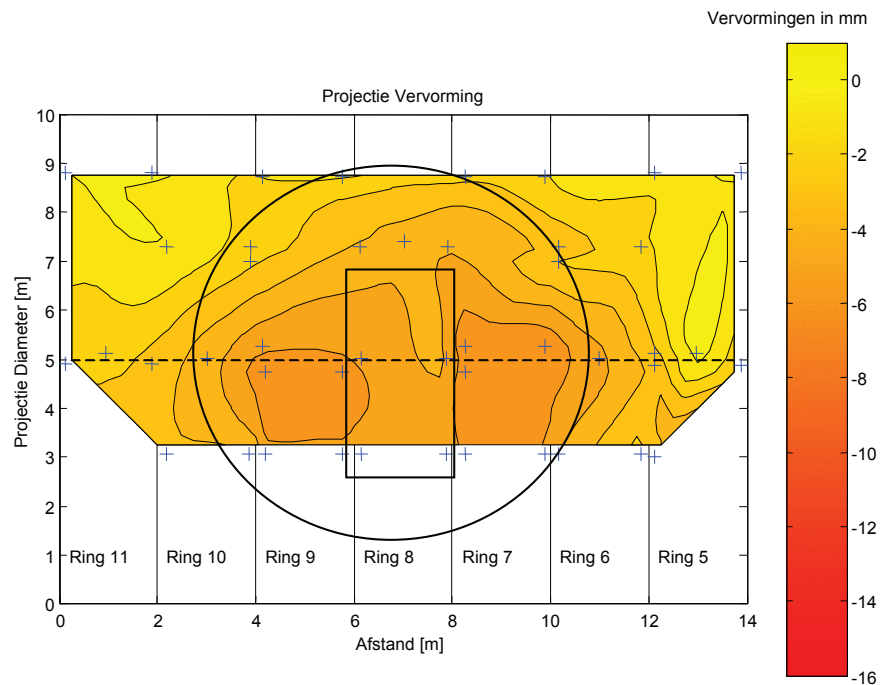
Vervormingen A-punten bij DV2, west, A-punten A01, A02, A04 en A05.



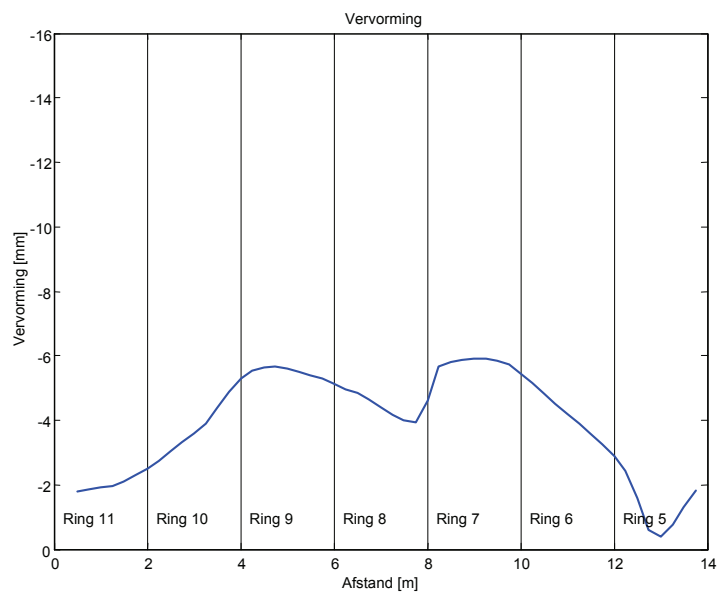
Vervormingen bij DV2, west, A-punten A10, A11, A13 en A14.

BIJLAGE P

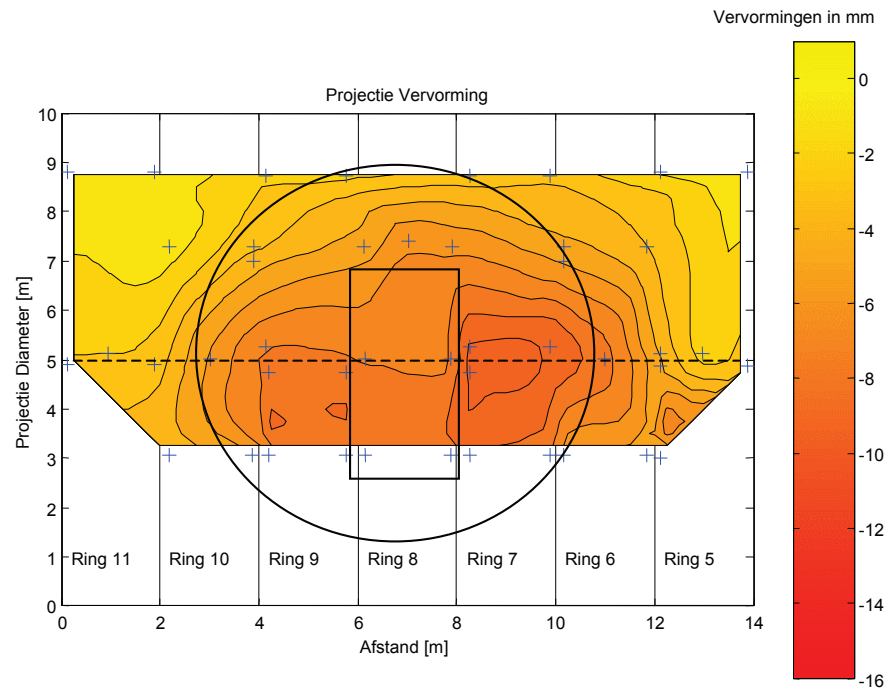
2D-PLOTS MET VOEGVERPLAATSINGEN (A-PUNTEN) BIJ DV2



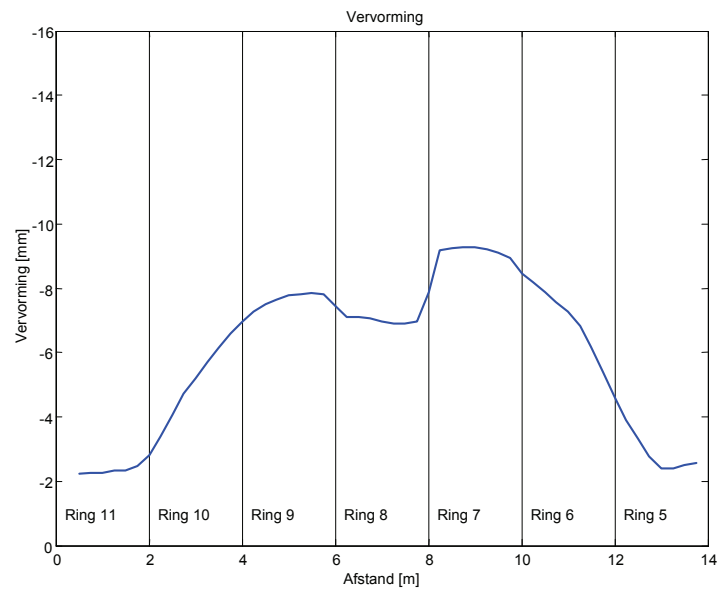
Overzicht verplaatsingen bij DV2 op 4 juli 2000



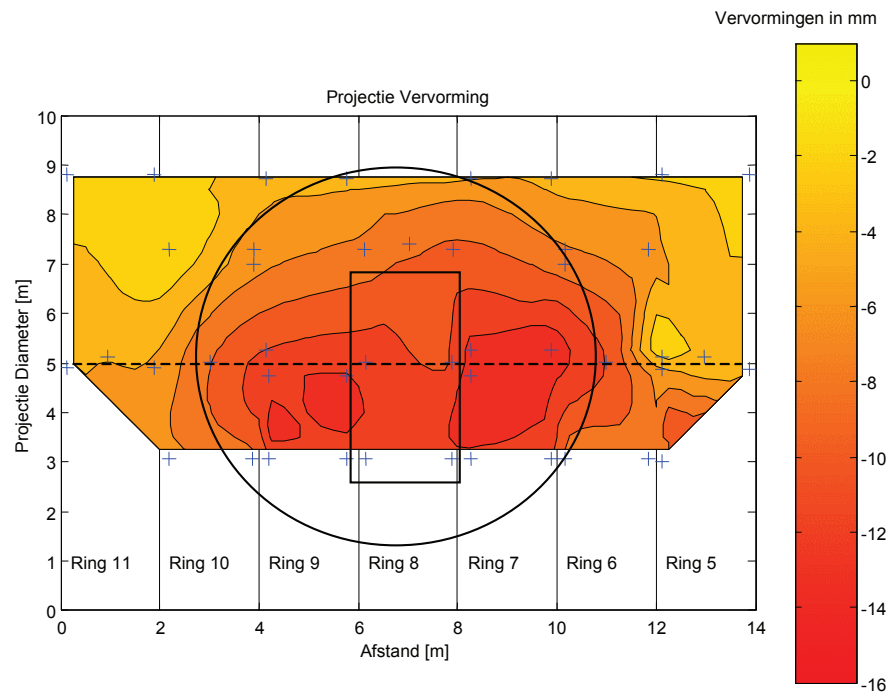
Grafiek met verplaatsingen bij op 4 juli 2000 (langs stippellijn in plot boven)



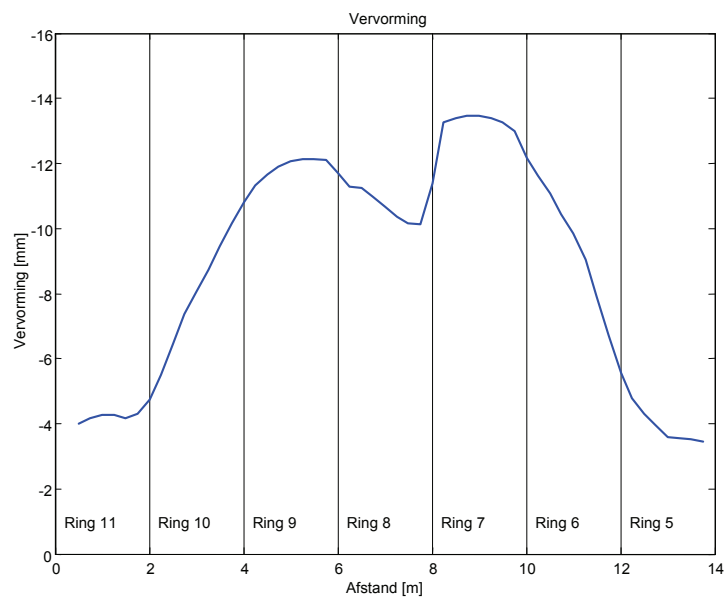
Overzicht verplaatsingen bij DV2 op 13 juli 2000



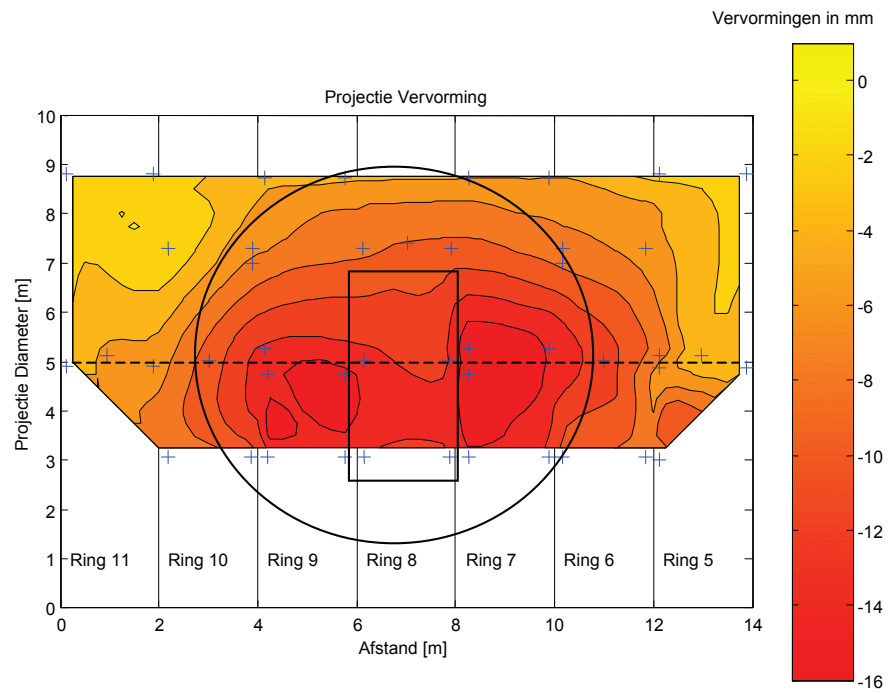
Grafiek met verplaatsingen bij DV2 op 13 juli 2000 (langs stippellijn in plot boven)



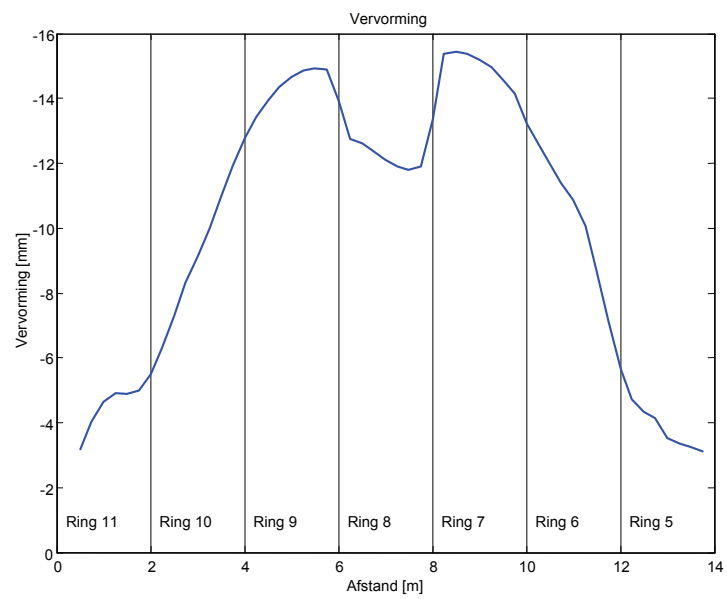
Overzicht verplaatsingen bij DV2 op 3 augustus 2000



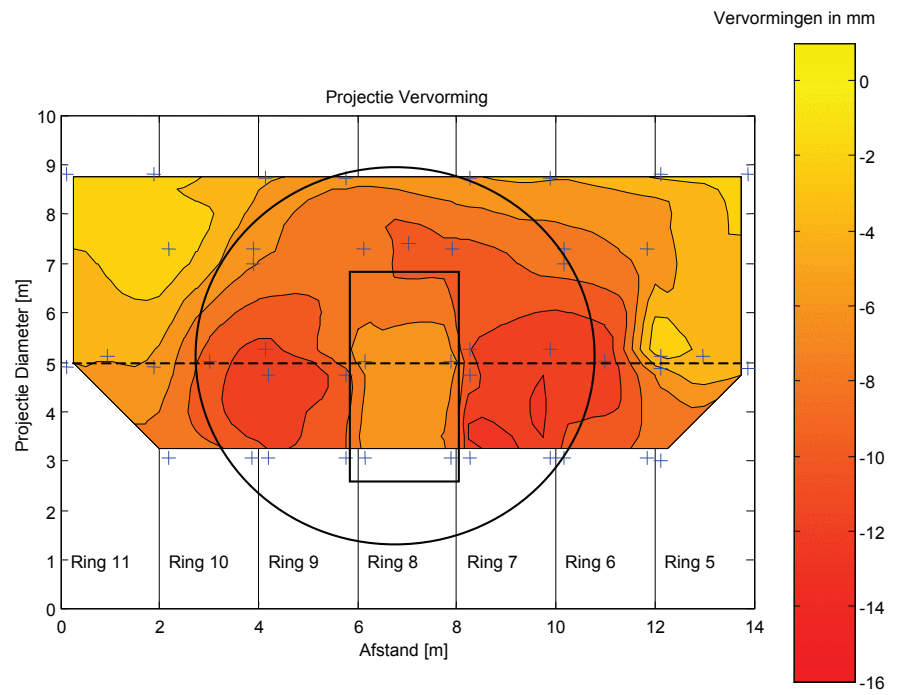
Grafiek met verplaatsingen bij DV2 op 3 augustus 2000 (langs stippellijn in plot boven)



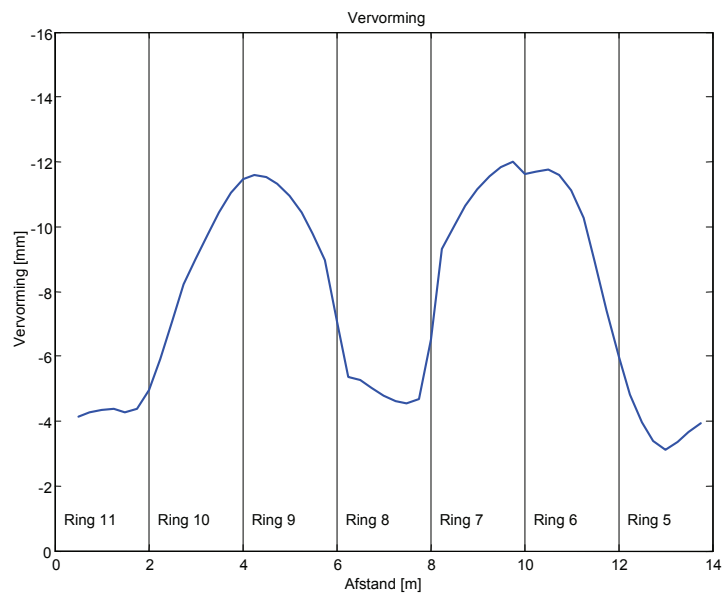
Overzicht verplaatsingen bij DV2 op 18 augustus 2000



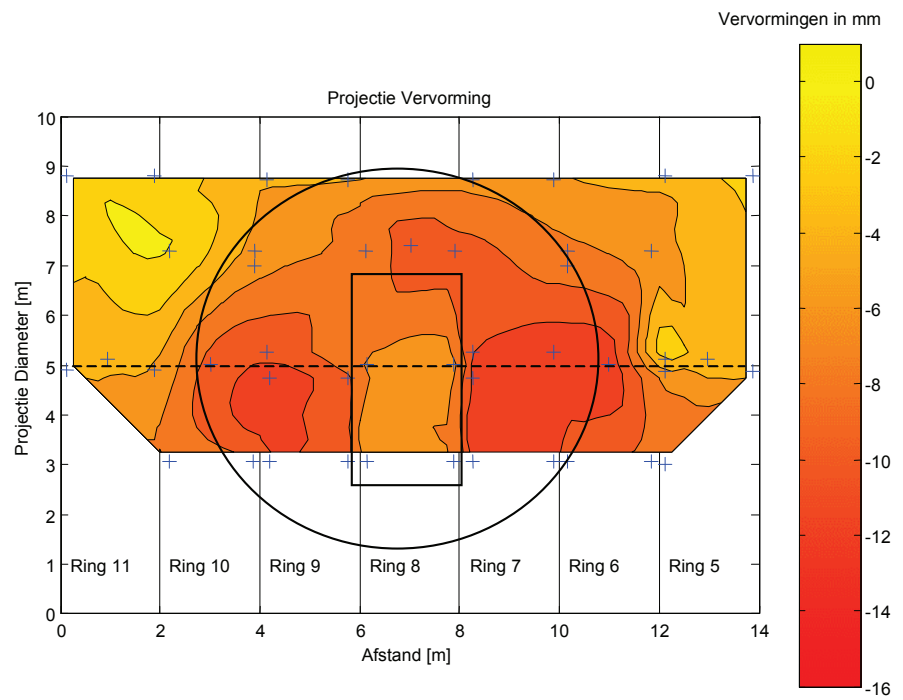
Grafiek met verplaatsingen bij DV2 op 18 augustus 2000 (langs stippellijn in plot boven)



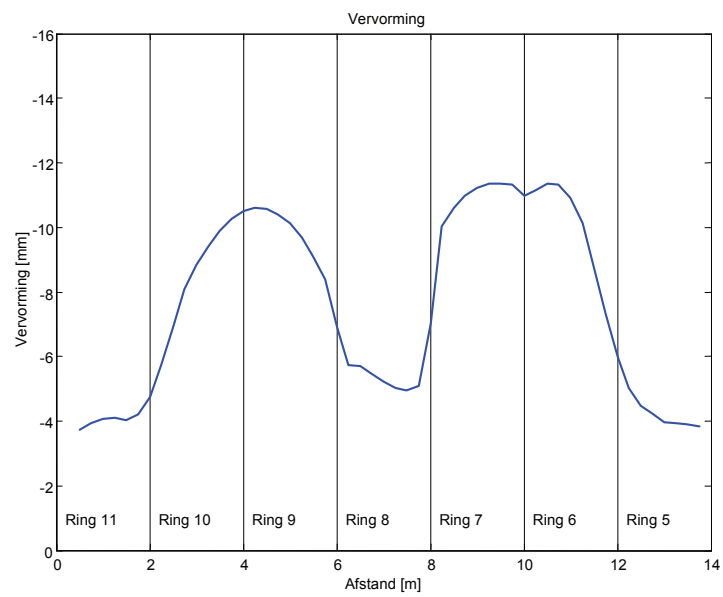
Overzicht verplaatsingen bij DV2 op 4 september 2000



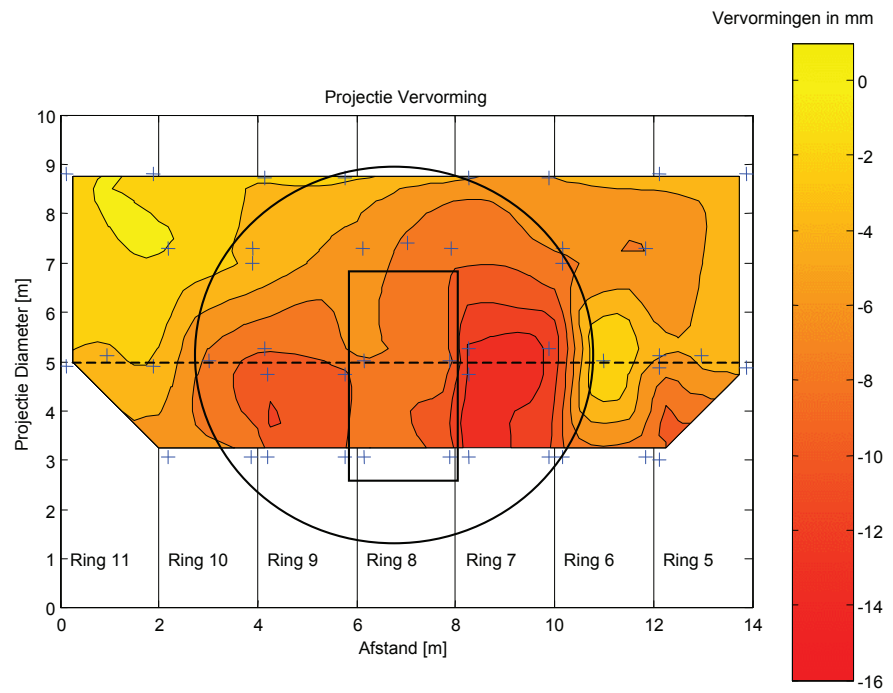
Grafiek met verplaatsingen bij DV2 op 4 september 2000 (langs stippellijn in plot boven).



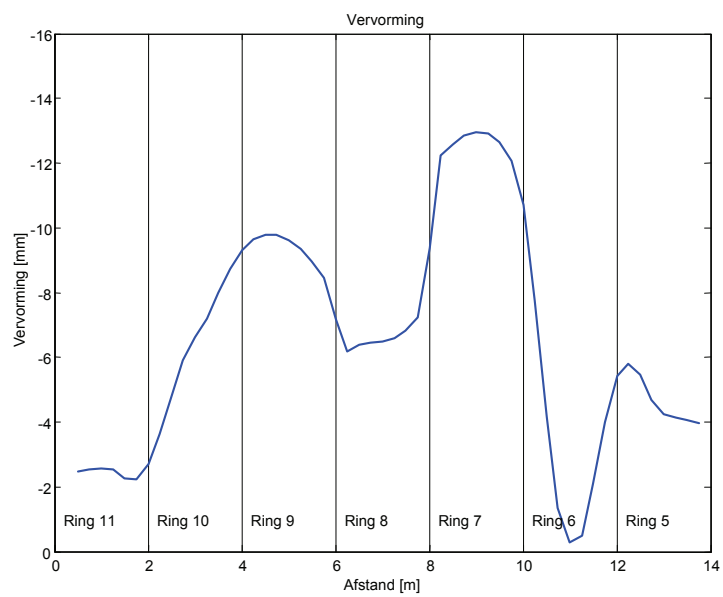
Overzicht verplaatsingen bij DV2 op 11 september 2000



Grafiek met verplaatsingen bij DV2 op 11 september 2000 (langs stippellijn in plot boven)



Overzicht verplaatsingen bij DV2 op 10 november 2000



Grafiek met verplaatsingen bij DV2 op 10 november 2000 (langs stippellijn in plot boven)