



VegDim

Materialdata

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 1067



Tittel

VegDim

Title

VegDim

Undertittel

Materialdata

Subtitle

Material Data

Forfatter

Rabbira Garba Saba

Author

Rabbira Garba Saba

Avdeling

Teknologi Drift og vedlikehold

Department

O&M Technology

Seksjon

Vedlikehold og utbedring

Section

Maintenance and Upgrading Support

Prosjektnummer

C13480

Project number

C13480

Rapportnummer

1067

Report number

1067

Prosjektleder

Brynhild Snilsberg

Project manager

Brynhild Snilsberg

Godkjent av

Brynhild Snilsberg

Approved by

Brynhild Snilsberg

Emneord

VegDim, vegteknologi, ME-dimensjonering, tilstandsutvikling, materialelegenskaper, dynamisk modul, stivhetsmodul

Key words

VegDim, pavement engineering, ME-design, performance prediction, material properties, dynamic modulus, stiffness modulus

Sammendrag

VegDim (2018-2024) har vært et FoU-program i Statens vegvesen, der målet har vært å utvikle og ta i bruk et ME-system for dimensjonering og analyser av vegoverbygninger. Dette vil gi oss mulighet til å beregne prognoser for tilstandsutvikling basert på nedbrytning pga klima- og trafikkbelastning. Elastiske materialelegenskaper utgjør noen av de viktigste inngangsdataene til ME-systemet. Denne rapporten beskriver arbeidet som ble gjort i VegDim-programmet for å skaffe materialdataene for de vanlige vegbyggingsmaterialene i Norge.

Summary

VegDim (2018-2024) was a R&D program conducted by the Norwegian Public Roads Administration. The goal was to develop and implement an ME pavement design system. Such system will provide the possibility to predict pavement deterioration caused by traffic and climate loading. Elastic material properties represent some of the most important input data for the ME-system. This report describes the work carried out under the VegDim-program to obtain the material data for the commonly used road building materials in Norway.

Forord

VegDim (2018-2024) har vært et FoUI-program i Statens vegvesen der målet var å utvikle et digitalt system for dimensjonering og analyser av vegoverbygninger basert på tilstandsutvikling. Dette er et mekanistisk-empirisk (ME) dimensjoneringssystem som vil gi oss mulighet til å beregne prognoser for tilstandsutvikling og levetid basert på nedbrytning pga klima- og trafikkbelastning.

Hovedleveransen fra FoUI-programmet er et nytt dimensjoneringssystem (dataverktøy) og en dimensjoneringspraksis der en har større fleksibilitet og mulighet til å dokumentere konsekvenser av ulike valg av materialer og lagtykkelser i vegbygging og vedlikehold.

Et ME-dimensjoneringssystem, som gir dokumentasjon på tilstandsutviklingen og levetiden til vegoverbygningen, vil gi et mye bedre beslutningsgrunnlag ved planlegging av veger. Dette vil gi grunnlag for optimalisert forvaltning av vegnettet (livsløpskostnader) og bedre langsiktige vedlikeholdsplaner. Ved bruk av dette verktøyet kan man også ta hensyn til miljø ved planlegging, bygging og vedlikehold av veger. Dette gjør at vi på en bedre måte kan oppnå reduksjon i energiforbruk og klimagassutslipp, som vil bidra til å oppnå nasjonale klimamål.

I FoUI-programmet VegDim ble et ME-system, kalt ERAPave PP (Elastic Response Analysis of Pavements – Performance Prediction), som er under utvikling ved Statens veg- og transportforskningsinstitutt (VTI) i Sverige, valgt for videreutvikling og tilpasning til norske forhold. Et norsk, web-basert dimensjoneringssystem der ERAPave PP utgjør den ME-delen er under utvikling og kalles VegDim, det vil si at den har fått samme navn som FoUI-programmet. I denne rapporten brukes benevnelsen VegDim/ERAPave PP for å referere til både web- og desktopversjonene av ME-systemet.

Noen av de viktigste inngangsparameterne i det nye digitale dimensjoneringssystemet VegDim/ERAPave PP er knyttet til materialegenskaper. Dimensjoneringssystemet baserer seg på beregning av tøyninger og spenninger som oppstår i vegoverbygningen under trafikkbelastning, samt beregning av tilstandsutvikling over tid. Elastiske materialegenskaper utgjør noen av de viktigste inngangsdataene i disse beregningene.

Denne rapporten beskriver arbeidet som ble gjort i VegDim-programmet for å skaffe materialdataene for de vanlige vegbyggingsmaterialene i Norge. Rapporten er en leveranse fra arbeidspakken Materialdata, som var ledet av Rabbira Garba Saba. Hao Chen, Helge Mork, Inge Hoff, Sara Anastasio, Brynhild Snilsberg, Leif Bakløkk, Tatek Yideti, Samson Abate, Diego Barbieri, og Arnhild Ulvik, Benoit Loranger har bidratt til arbeidet som ble gjort i arbeidspakken. Testing for bestemmelse av dynamiske moduler for asfaltmasser var utført av Hao Chen ved NTNU. Rapporten er utarbeidet av Rabbira Garba Saba. Brynhild Snilsberg, Sara Anastasio, og Joralf Aurstad har gjennomgått utkastet til rapporten og kommet med innspill.

Rabbira Garba Saba, arbeidspakkeleder Materialdata

Statens vegvesen, juni 2025

Innhold

Forord	1
Sammendrag	3
1 Innledning	4
2 Mest vanlige vegbyggingsmaterialer i Norge	5
2.1 Mest brukte asfaltmaterialer	5
2.2 Mest brukte ubundne materialer	6
3 Viktige inngangsdata om materialelegenskaper i VegDim/ERAPave PP	8
3.1 Elastiske materialelegenskaper	8
3.2 Andre materialdata	8
4 Bestemmelse av dynamisk modul for asfaltmasser	10
4.1 Dynamisk modul for asfaltmasser	10
4.2 Materialer	10
4.3 Proporsjonering	12
4.4 Prøvetillaging	14
4.5 Testing for bestemmelse av dynamisk modul	15
4.6 Konstruksjon av masterkurve	16
5 E-modul for ubundne materialer	18
5.1 Estimering av E-modul verdier for ubundne materialer	18
5.2 Bruk av data fra tidligere forsøk	19
5.3 Etterregning av E-modulverdier fra falloddsmålinger	19
5.4 Resultater fra lab-testing av undergrunnmaterialer	21
5.5 Estimerte E-modulverdier for ubundne materialer	23
6 Referanser	27
7 Vedlegg	28
7.1 Skjema for innsamling av informasjon om mest brukte materialer i vegbygging og vedlikehold	28
7.2 Sammendrag av svar fra regioner	31

Sammendrag

Denne rapporten beskriver arbeidet med å skaffe materialdata for vanlige vegbyggingsmaterialer i Norge, som en del av VegDim-programmet. Materialelegenskaper er avgjørende for beregning av tøyninger og spenninger i vegoverbygningen under trafikkbelastning, samt for tilstandsutvikling over tid.

En spørreundersøkelse blant vegteknologer i Statens vegvesen identifiserte de mest brukte vegbyggingsmaterialene i Norge. Resultatene ble brukt til å prioritere lab-testing av asfaltmaterialer. De mest brukte asfaltmassene på høytrafikkerte veger inkludere Ab-, Ska- og Agb-masser med maks steinstørrelse på 16 eller 11 mm. På lavtrafikkerte veger brukes mest Agb-masser med maks steinstørrelse på 16 eller 11 mm. Når det gjelder bindemidler er det bindemiddeltypene 70/100, PmB og 160/220 som brukes mest.

Ubundne granulære materialer brukes i bærelag, forsterkningslag og frostsikringslag. De mest brukte materialene omfatter kult, pukk og samfengt knust berg.

Elastiske materialelegenskaper som elastisitetsmodul og tverrrkontraksjonstall er nødvendige for beregning av respons på ulike dybder i vegoverbygningen og tilstandsutvikling over tid. Andre materialdata omfatter varmeledningsevne, latent fusjonsvarme, segregasjonspotensial, tørrdensitet, kulemølleverdi, maks steinstørrelse i slitelaget, og andel tilslagsmateriale med størrelse over 4 mm.

Testing av asfaltmasser i laboratoriet bestemte den dynamiske modulen, som varierer med temperatur og belastningsfrekvens. Masterkurver ble etablert for å representere denne variasjonen. Parametere som beskriver masterkurven, er lagt inn i materialdatabasen.

E-modulene for ubundne materialer og undergrunn ble estimert basert på tidligere forsøk, bæreevnemålinger og lab-testing. Estimerte verdier for ulike materialer er gitt i rapporten og lagt inn i materialdatabasen.

Materialdatabasen gjør karakteristiske materialdata tilgjengelige for brukere av VegDim/ERAPave PP, noe som sparer tid og ressurser. Brukere kan også teste egne materialer i henhold til standardiserte metoder og bruke disse i dimensjonering av vegoverbygninger.

1 Innledning

Noen av de viktigste inngangsparameterne i det nye digitale dimensjoneringsystemet VegDim/ERAPave PP er knyttet til materialegenskaper. Dimensjoneringsystemet baserer seg på beregning av tøyninger og spenninger som oppstår i vegoverbygningen under trafikkbelastning, samt beregning av tilstandsutvikling over tid. Beregningen av tøyninger og spenninger er basert på elastisitetsteori for lagdelte konstruksjoner, hvor elastiske materialegenskaper utgjør de viktigste inngangsdataene. Materialegenskapene inngår også i beregning av tilstandsutvikling, slik som utmatting og sporutvikling.

Disse elastiske egenskapene omfatter materialenes elastisitetsmodul og tverrrkontraksjonstall. Tverrrkontraksjonstallet for vegbyggingsmaterialer varierer lite og anses å være ca. 0,35 for asfalt, 0,4 for ubundne granulære materialer og 0,45 for undergrunnen. Elastisitetsmodulen, derimot, påvirkes av flere faktorer og varierer mye. Elastisitetsmodulen må derfor bestemmes ved testing av materialene.

For å gjøre implementeringen og bruken av dimensjoneringsystemet lettere, er det i VegDim-programmet gjennomført lab-testing av noen vanlige vegbyggingsmaterialer som benyttes i Norge. Lab-testingen omfattet bestemmelse av den dynamiske modulen for asfaltmasser og stivhetsmodulen for noen undergrunnmaterialer. For noen av de grove, ubundne materialene ble det utført ikke-destruktiv felttesting (falloddstest) for å estimere elastisitetsmodulene.

En materialdatabase ble etablert og koblet til dimensjoneringsystemet for å gjøre materialdataene tilgjengelige. Materialdatabasen utgjør et viktig redskap som gjør at brukere av dimensjoneringsystemet får tilgang til egenskapene til de vanlig brukte materialene uten å måtte teste materialene selv, noe som kan spare mye tid og ressurser for brukerne. I VegDim/ERAPave PP skal det også åpnes for bruk av egne materialer/materialegenskaper for dem som ønsker det. I så fall må brukerne teste materialene i henhold til standardiserte metoder og dokumentere resultatene.

Denne rapporten beskriver arbeidet som ble gjort i VegDim-programmet for å skaffe materialdataene for de vanlige vegbyggingsmaterialene i Norge.

2 Mest vanlige vegbyggingsmaterialer i Norge

I N200 Vegbygging er det beskrevet flere materialtyper, både bundne og ubundne, samt flere sorteringer av materialtypene. Imidlertid brukes ikke disse materialtypene like mye. For å identifisere de mest brukte vegbyggingsmaterialene ble det gjennomført en spørreundersøkelse i starten av VegDim-programmet. Spørreundersøkelsen ble sendt til vegteknologer i alle fem daværende regioner (nå områder), og samtlige svarte på undersøkelsen. Skjemaet som ble brukt, samt svarene fra regionene, er gitt i vedlegg 7.1.

Resultatet fra spørreundersøkelsen ble lagt til grunn for planlegging og utførelse av lab-testing for asfaltmaterialer, dvs. de mest brukte massetypene ble prioritert i testingen. I dette kapitlet gis en kort sammenfatning av svarene fra regionene.

2.1 Mest brukte asfaltmaterialer

I spørreundersøkelsen ble vegteknologene spurt om å rangere de mest brukte materialene (1 = mest brukt, 2 = nest mest brukt osv.). Tabell 2.1 og Tabell 2.2 viser asfaltmasser som ble rangert fra 1 til 3, dvs. de mest brukte massetypene på henholdsvis høytrafikkerte og lavtrafikkerte veger. Tabell 2.3 viser de mest brukte bindemiddeltypene.

Man kan se fra tabellene 2.1 og 2.2 at det stort sett er Ab-, Ska- og Agb-massene med en maks steinstørrelse på 16 eller 11 mm som brukes i slitelag og bindlag. I asfaltbærelaget er Ag med 16 mm maks steinstørrelse dominerende, mens Ag 22 og Ap 16 brukes i mindre grad.

Tabell 2.3 viser at bindmiddeltypene 70/100, PmB og 160/220 brukes mest, mens myke bindemidler (330/430, V12000 og V6000) brukes i liten grad. Når det gjelder PmB-bindemidler, brukes nesten utelukkende PmB 65/105-60, en SBS-modifisert bitumen med penetrasjon mellom 65 og 105 og mykningspunkt på 60 °C.

Tabell 2.1: Rangering av de mest brukte asfaltmasse typer på høytrafikkerte veger

Region	Slitelag			Bindlag			Bærelag		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Nord	Ab 16	Ska 16	Ab 11	Ab 11	Agb 11	Ab 16	Ag 16	Ag 22	Ak
Midt	Ska 16	Ska 11	Ab 11	Ab 11	Ska 11	Ska 16	Ag 16	Ap 16	Ap 22
Vest	Ab 16	Ab 11	Ska 11	Ab 11	Ab 16		Ag 16		
Øst	Ska 16	Ab 16	Ab 11	Ska 16	Ab 16	Ab11	Ag 16	Ag 11	Ap 16
Sør	Ab 16	Ab 11	Ska 16	Ab 16	Ab 11		Ag 16	Ag 22	

Tabell 2.2: Rangering av de mest brukte asfaltmasse typer på lavtrafikkerte veger

Region	Slitelag			Bindlag			Bærelag		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Nord	Agb 16	Agb 11	Ma 16	Agb 11	Ab 11		Ag 16	Ag 22	
Midt	Agb 11	Ab 11	Agb 16	Agb 11	Ab 11	Agb 16		Ag 16	
Vest	Agb 11	Agb 16	Ab 16	Agb 11	Agb 16		Ag16		
Øst	Agb 11/8	Ab 11	Ma 11/16	Agb 11	Ab 11	Agb 8		Ag 16	Ap 16
Sør	Ab 16	Agb 11		Agb 16	Ab 16		Ag 16	Ag 22	

Tabell 2.3: Rangering av de mest brukte bindemiddeltyper i asfaltmassene

Region	Høytrafikkerte veger			Lavtrafikkerte veger		
	1	2	3	1	2	3
Nord	160/220	330/430 for Ag	50/70	160/220	330/430 for Ag	V6000
Midt	PMB	70/100		160/220	V12000	
Vest	70/100	PMB		160/220	70/100	
Øst	PMB	70/100		70/100+V12000	160/220	
Sør	70/100	PMB		70/100	100/150	

2.2 Mest brukte ubundne materialer

Ubundne granulære materialer brukes i bærelag (ofte i det nedre bærelaget), forsterkningslag og frostsikringslag. I N200 Vegbygging er det beskrevet flere sorteringer av ulike ubundne materialer. Tabellene 2.4 og 2.5 viser de mest brukte ubundne materialene, rangert fra 1 til 3 i svarene fra spørreundersøkelsen, for henholdsvis høytrafikkerte og lavtrafikkerte veger.

Det viser seg at det nesten ikke brukes ubundne materialer i bærelaget på høytrafikkerte veger. På lavtrafikkerte veger brukes knust berg Fk 0/32 og knust asfalt Ak mest i bærelaget. I forsterkningslaget brukes kult og pukk mest, både på høytrafikkerte og lavtrafikkerte veger, mens samfengt knust berg også brukes en del på lavtrafikkerte veger. I frostsikringslaget brukes knust berg mest, mens sand, grus og isolasjonsmaterialer brukes i mindre grad.

Tabell 2.4: Rangering av de mest brukte ubundne materialer i bærelag, forsterkningslag, og frostsikringslag på høytrafikkerte veger

Område	Bærelag			Forsterkningslag			Frostsikringslag		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Nord			Ak	Kult 22/125	Pukk 11/90	Samfengt knust berg 0/90	Knust berg	Skumglass	Grus
Midt				Kult 22/125	Kult 22/180		Knust berg	Grus	(noe XPS og skumglass)
Vest				Kult 22/125	Pukk 11/90		Knust berg	Masseutskiftning med stedlige T2 masser/sprengstein iht. tabell 521.2, N200	Kult
Øst				Kult 22/125		Pukk 11/90	Knust berg	Sand/Grus	XPS/lettklinker/skumglass
Sør				Kult 22/125	Samfengt knust berg 0/90	Kult 22/180	Knust berg	Sand	XPS/lettklinker/skumglass

Tabell 2.5: Rangering av de mest brukte ubundne materialer i bærelag, forsterkningslag, og frostsikringslag på lavtrafikkerte veger

Område	Bærelag			Forsterkningslag			Frostsikringslag		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Nord	Fk 0/32	Ak		Kult 22/125	Pukk 11/90	Samfengt knust berg 0/90	Knust berg	Skumglass	Grus
Midt	Fk 0/32		Fk 0/45	Kult 22/125	(Samfengt kunst berg 0/90 G/S-veg)	Kult 22/180	(sjelden, uspesifikt)		
Vest	Fk 0/32	Ak		Kult 22/125	Pukk 11/90	Samfengt knust berg 0/63	Masseutskiftning med stedlige T2 masser/sprengstein iht. tabell 521.2, N200	Knust berg	Kult
Øst	Fk 0/32			Kult 22/125	Pukk 11/90+Grus 0/90		(sjelden)		
Sør	Fk 0/32	Ak		Kult 22/125	Samfengt kunst berg 0/90	Kult 22/180	Knust berg	Sand	XPS/lettklinker/skumglass

3 Viktige inngangsdata om materialegenskaper i VegDim/ERAPave PP

VegDim/ERAPave PP er et mekanistisk-empirisk dimensjonerings- og analyseverktøy. Verktøyet beregner spenninger og tøyninger i en vegoverbygning basert på elastisitetsteori for lagdelte konstruksjoner. Disse beregningene krever elastiske materialegenskaper som inngangsdata. I tillegg beregnes tilstandsutviklingen over tid ved bruk av empiriske modeller som krever materialrelaterte parametere som inngangsdata, for eksempel ved beregning av utmatting. Dette kapitlet gir en kort beskrivelse av nødvendige inngangsdata om materialegenskapene for bundne og ubundne materialer.

3.1 Elastiske materialegenskaper

I elastisitetsteori for lagdelte konstruksjoner forutsettes det at alle lagmaterialer oppfører seg som elastiske materialer, det vil si at materialenes respons på belastning følger Hookes lov. Ifølge Hookes lov er det en lineær sammenheng mellom spenninger og tøyninger. Som et eksempel viser ligning 3.1 sammenhengen mellom elastisk tøyning (ϵ_z) i z (vertikal)-retning i et asfaltlag og spenningskomponentene i x-, y- og z-retninger (σ_x , σ_y , σ_z).

$$\epsilon_z = \frac{1}{|E^*|} (\sigma_z - \mu\sigma_x - \mu\sigma_y) \quad (3.1)$$

I ligning 3.1 gir E^* og μ sammenhengen mellom spenning og tøyning for asfaltmaterialet, det vil si at de beskriver materialets elastiske respons. E^* er elastisitetsmodul (kalles dynamisk modul for asfalt) og er forholdet mellom spenningen og tøyningen mens μ er tverrkontraksjonstall (også kalt Poissons tall). Tverrkontraksjonstallet er et mål for hvor mye materialet utvider seg i tverrretningen når det blir trykket sammen i lengderetningen. Det er derfor disse to elastiske materialegenskapene for bundne og ubundne materialer som er nødvendige for å utføre beregning av respons på ulike dybder i en vegoverbygning i VegDim/ERAPave PP. Tverrkontraksjonstallet for vegbyggingsmaterialer varierer lite og kan antas å være på ca. 0,35 for asfalt, 0,4 for ubundne granulære materialer, og 0,45 for undergrunnen. Elastisitetsmodulen for de ulike materialene må bestemmes enten ved laborietester eller feltmålinger. Feltesting for bestemmelse av elastisitetsmodul omfatter nedbøyingmålinger på eksisterende veg og etterregning av elastisitetsmodul. I VegDim-programmet er det gjennomført laborietester for å bestemme dynamisk modul for asfaltmaterialer, som beskrevet i kapittel 4. Elastisitetsmodulene for ubundne materialer er estimert basert på etterregning fra falloddsmålinger, tidligere forsøk og faglig skjønn. Arbeidet med estimering av elastisitetsmodul for ubundne materialer er beskrevet i kapittel 5.

3.2 Andre materialdata

Som nevnt ovenfor beregner VegDim/ERAPave PP tilstandsutvikling (skadeutvikling) over tid. Skadetyperne som beregnes omfatter sporutvikling (både deformasjonsspor og slitasje), utmatting og telehiv. I tillegg sjekkes maks tøyning mot undergrunn under ekstremlast. Disse beregningene krever noen materialdata i tillegg til de elastiske materialegenskapene som er omtalt i kapittel 3.1.

For å beregne slitasjespor for slitelagsmaterialet kreves følgende inngangsdata:

- Maks steinstørrelse

- Andel av tilslagsmaterialet med steinstørrelse over 4 mm
- Mølleverdi for tilslagsmaterialet (eller Prall-verdi for asfaltmassen)

Beregning av telehiv og frostnedtrengning krever frostegenskaper som inngangsdata, herunder:

- Varmeledningsevne
- Latent fusjonsvarme
- Segregasjonspotensial
- Tørrdensitet

Varmeledningsevne og latent fusjonsvarme kan antas å være konstante for vegbyggingsmaterialer og er hentet fra litteraturen. Segregasjonspotensial må bestemmes ved laboratorietesting. Verdier for segregasjonspotensial for noen norske vegbyggingsmaterialer har tidligere blitt bestemt ved laboratorietesting ved NTNU. Disse verdiene, sammen med lignende verdier fra litteraturen, legges til grunn i beregningen av telehiv i VegDim/ERAPave PP-programmet.

I VegDim/ERAPave PP beregnes temperaturen i asfaltlagene ved bruk av en temperaturmodell som benytter flere materialrelaterte parametere. Disse omfatter:

- Albedo
- Absorpsjonskoeffisient
- Emissivitetskoeffisient

Verdiene for disse materialparameterne er hentet fra litteraturen og anses som konstante.

4 Bestemmelse av dynamisk modul for asfaltmasser

Basert på spørreundersøkelsen som er beskrevet i kapittel 2, ble de vanligste asfaltmassene valgt ut for testing i laboratoriet for å bestemme den dynamiske modulen. Arbeidet som ble utført med proporsjonering, prøvelagging, testing samt etablering av masterkurven, er omtalt i dette kapittelet. En mer detaljert beskrivelse av dette arbeidet er gitt i [1].

4.1 Dynamisk modul for asfaltmasser

Asfalt er et visko-elasto-plastisk materiale med egenskaper som avhenger av både temperatur og belastningshastighet (frekvens). Den dynamiske modulen beskriver de lineær-viskoelastiske egenskapene til asfaltmasser og varierer med både temperatur og belastningsfrekvens. Hvis et asfaltmateriale påføres en syklisk (sinusformet) belastning, uttrykt i ligning 4.1, vil materialet få et tøyingsforløp som er uttrykt i ligning 4.2.

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t) \quad (4.1)$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi) \quad (4.2)$$

der σ_0 er spenningsamplituden, ε_0 er tøyingsamplituden, ω er vinkelfrekvensen, og φ er fasevinkelen (tidsforskyvning mellom spenning og tøyning). Forholdet mellom spenningen og tøyningen gir kompleksmodulen for asfaltmaterialet. Ligningene 4.1 og 4.2 kan uttrykkes som henholdsvis 4.3 og 4.4 ved bruk av imaginærtallet i .

$$\sigma^*(t) = \sigma_0 e^{i\omega t} \quad (4.3)$$

$$\varepsilon^*(t) = \varepsilon_0 e^{i(\omega t - \varphi)} \quad (4.4)$$

Kompleksmodulen er uttrykt i ligning 4.5.

$$E^*(\omega) = \frac{\sigma^*(t)}{\varepsilon^*(t)} = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 e^{i(\omega t - \varphi)}} = |E^*| e^{i\varphi} \quad (4.5)$$

der $|E^*|$ er absoluttverdien av kompleksmodulen og kalles den dynamiske modulen. Den dynamiske modulen er lik forholdet mellom maksimal spenning og maksimal tøyning (σ_0/ε_0) som er kalt spenningsamplitude og tøyingsamplitude ovenfor.

4.2 Materialer

Asfaltmasser med ulike bindemiddeltypen ble laget i laboratoriet. Tabell 4.1 viser en liste over massetyper som ble testet. Tilslagsmaterialet omfattet Vassfjell (knust berg fra Franzefoss Pukk) og naturgrus (fra Forset Grus). Som filler ble det brukt Hylla Kalkmel. Tabell 4.2 og 4.3 gir egenskapene til de ulike fraksjonene av tilslagsmaterialet. Asfaltmassene inneholdt ulike bindemiddeltypen, men samme tilslagsmateriale. Det er kjent fra tidligere forskning/testing at den dynamiske modulen til asfaltmaterialer er sterkt avhengig av bindemiddlets egenskaper og påvirkes av tilslagsmaterialets egenskaper i vesentlig mindre grad. Derfor ble det besluttet å bruke samme type tilslagsmateriale i denne testingen, mens bindemiddeltypen varierte og omfattet alle de mest brukte bindemiddeltypene. Bindemidlenes egenskaper er angitt i Tabell 4.4.

Tabell 4.1: Liste over asfaltmasse typer som ble testet

Masse	Bindemiddeltype	Masse	Bindemiddeltype
Ab 11	70/100	Ska 16	70/100
Ab 11	PMB	Ska 16	PMB
Ab 16	70/100	Ma 11	V1500
Ab 16	PMB	Ma 11	V6000
Agb 11	160/220	Ma 16	V3000
Agb 11	330/430	Ma 16	V9000
Agb 16	160/220	Ma 16	V12000
Agb 16	330/430	Ag 16	70/100
Ska 11	70/100	Ag 16	160/220
Ska 11	PMB	Ap 16	70/100

Tabell 4.2: Densitet for tilslagsmaterialer

Partikkelstørrelse [mm]	Densitet [Mg/m ³]	
	Vassfjell	Naturgrus
11.2 – 16	3,066	2,746
8 – 11.2	3,050	2,748
4 – 8	3,048	2,749
2 – 4	3,032	2,752
1 – 2	3,038	2,753
0.25 – 1	3,039	2,755
0.063 – 0.25	3,049	2,786
< 0.063	3,025	2,817
Kalkmel (filler)	2,798	

Tabell 4.3: Tilslagsmaterialets mekaniske egenskaper

	Kulemølleverdi (A _n , %)	Std.avvik (%)	M _{DE} -verdi (%)	Std.avvik (%)	LA-verdi (%)	Std.avvik (%)
Vassfjell	7,8	0,2	14,2	0,8	18,2	0,2
Naturgrus	17,3	0,3	17,3	0,2	27,7	0,3

Tabell 4.4: Bindemiddel egenskaper

Bindemiddeltype		Penetrasjon ved 25°C (0,1mm)		Mykningspunkt (°C)		Dynamisk/kinematisk viskositet ved 60°C (Pa.s el. mm ² /s)	
		Verdi	Krav	Verdi	Krav	Verdi	Krav
Umodifisert	70/100	92	70-100	46	43-51	235,7 Pa.s	≥ 90 Pa.s
	160/220	189	160-220	38,1	35-43	102,6 Pa.s	≥ 30 Pa.s
	330/430	-	-	-	-	44,5 Pa.s	≥ 12 Pa.s
PmB	65/105-60	88	65-105	62,6	≥ 60	391,8 Pa.s	-
Mykt	V1500	-	-	-	-	1708 mm ² /s	1000 – 2000 mm ² /s
	V3000	-	-	-	-	2815 mm ² /s	2000 – 4000 mm ² /s
	V6000	-	-	-	-	5450 mm ² /s	4000 – 8000 mm ² /s
	V9000	-	-	-	-	8990 mm ² /s	6000 – 12000 mm ² /s
	V12000	-	-	-	-	14036 mm ² /s	8000 – 16000 mm ² /s

4.3 Proporsjonering

Asfaltmassene ble proporsjonert ved bruk av Marshallmetoden, som beskrevet i Statens vegvesens retningslinje R210 Laboratorieundersøkelser (2005-versjonen), og i henhold til gjeldende krav i N200 Vegbygging (N200:2021) for minimum bindemiddelinnhold. Tilslagsmaterialet ble siktet og satt sammen i henhold til graderingskravene for hver masstype. Prøvene ble komprimert med 75 slag på hver side i Marshallstampeapparatet. Før testing i Marshallpressen ble prøvene kondisjonert ved 60 °C for prøver med penetrasjonsgraderte bindemidler og 40 °C for prøver med myke bindemidler. Optimalt bindemiddelinnhold ble bestemt basert på resultatene fra Marshalltesting. Tabell 4.5 viser gradering og optimalt bindemiddelinnhold for samtlige masstyper.

Tabell 4.5: Gradering og optimum bindemiddelinnhold

Masse	Gjennomgang [%] for siktstørrelse [mm]									Optimum bindemiddelinnhold [%]
	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,25	0,063	
Ab 11-70/100		100	95	70	47,5	33,5	25,5	12,5	7,5	5,1
Agb 11-160/220		100	95	77	56	41,5	31,5	15	7,5	5,2
Agb 11-330/430		100	95	77	56	41,5	31,5	15	7,5	5,8
Ab 11-PMB		100	95	70	47,5	33,5	25,5	12,5	7,5	5,2
Ab 16-70/100	100	95	71	58		31,5	24,5	13,5	8	4,9
Agb 16-160/220	100	95	76	65		35,5	24,5	12,5	5,5	5,0
Agb 16-330/430	100	95	76	65		35,5	24,5	12,5	5,5	5,6
Ab 16-PMB	100	95	71	58		31,5	24,5	13,5	8	4,9
Ska 11-70/100		100	95	55,5	37,5	26		16	11	5,3
Ska 11-PMB		100	95	55,5	37,5	26		16	11	5,3
Ska 16-70/100	100	95	56	37		22,5		13,5	10	5,1
Ska 16-PMB	100	95	56	37		22,5		13,5	10	5,2
Ma 11-V1500		100	94,5	79,5	60	43,5	34	17	6	4,3
Ma 11-V6000		100	94,5	79,5	60	43,5	34	17	6	4,2
Ma 16-V3000	100	92,5	80,5		46	31	21	8	5	4
Ma 16-V9000	100	92,5	80,5		46	31	21	8	5	4,2
Ma 16-V12000	100	92,5	80,5		46	31	21	8	5	4,2
Ag 16-70/100	100	95	75			35,5		12,5	6	4,7
Ag16-160/220	100	95	75			35,5		12,5	6	4,6
Ap 16-70/100	100	95	45	34,5		17		6,5	5	2,8

4.4 Prøvetillaging

Asfaltprøvene ble laget ved bruk av dynamisk komprimering (roller compactor), der asfaltplater med størrelse 305 mm × 305 mm × 57 mm ble produsert. Komprimeringsutstyret er vist i Figur 4.1. Prøver med 100 mm i diameter ble boret ut fra platene og kappet for å få prøver med 40 mm høyde i henhold til teststandarden. Figur 4.2 viser bilde av ferdiglagde prøver. Fire testprøver ble boret ut fra hver plate. Densitet og hulrominnhold for de ferdige prøvene er vist i Tabell 4.6.



Figur 4.1: Dynamisk komprimeringsutstyr



Figur 4.2: Ferdiglagede prøver

Tabell 4.6: Volumetriske egenskaper for testprøvene

Masse	Densitet [Mg/m ³]	Hulrom, V _a [%]	Hulrom i steinskjelettet, VMA [%]	Bitumenfylt hulrom, VFB [%]
Ab 11-70/100	2,655	3,5	16,9	79,1
Agb 11-160/220	2,557	3,0	16,1	81,7
Agb 11-330/430	2,539	2,7	17,2	84,6
Ab 11-PMB	2,684	2,3	16,1	85,7
Ab 16-70/100	2,686	2,9	16,0	81,7
Agb 16-160/220	2,647	2,8	15,9	82,6
Agb 16-330/430	2,574	4,4	18,7	76,4
Ab 16-PMB	2,697	2,5	15,6	83,8
Ska 11-70/100	2,597	5,2	18,8	72,5
Ska 11-PMB	2,676	2,3	16,4	85,8
Ska 16-70/100	2,650	3,9	17,3	77,5
Ska 16-PMB	2,689	2,3	16,2	85,6
Ma 11-V1500	2,684	3,7	15,6	76,4
Ma 11-V6000	2,635	5,7	17,0	66,3
Ma 16-V3000	2,629	6,3	17,2	63,1
Ma 16-V9000	2,631	6,0	17,3	65,1
Ma 16-V12000	2,594	7,4	18,5	60,2
Ag 16-70/100	2,563	7,9	19,9	60,0
Ag 16-160/220	2,565	8,1	19,7	59,2
Ap 16-70/100	2,430	15,8	22,6	30,0

4.5 Testing for bestemmelse av dynamisk modul

Testing for bestemmelse av dynamisk modul ble utført ved NTNU i henhold til EN 12697-26 [2] ved bruk av syklisk indirekte strekktesting (CITT). Testingen ble utført med en servo-pneumatisk universell testmaskin (Nottingham Asphalt Tester, NAT) som påførte en kontrollert, harmonisk, sinusformet belastning. To lineære variable differensialtransformatorer (LVDT) ble plassert horisontalt på hver side for å måle den resulterende deformasjonen. Testutstyret er vist i Figur 4.3.

Testingen ble gjennomført ved ulike belastningsfrekvenser (10 – 5 – 3 – 1 – 0,3 – 0,1 Hz) og ulike testtemperaturer (-15, -10, 0, 15, 30 °C) i henhold til teststandarden. Fire parallelle prøver ble testet for hver masstype, det vil si at totalt 80 prøver ble testet. De påførte lastene ble justert for å sikre at den initiale horisontale tøyingsamplituden var i området mellom 50 og 100 µε for hver testfrekvens og temperatur. Dette kravet sikret at testingen ble utført innenfor det lineær-viskoelastiske (LVE) området for asfaltmaterialene.



Figur 4.3 CITT testutstyr

4.6 Konstruksjon av masterkurve

Som nevnt tidligere varierer den dynamiske modulen med belastningsfrekvens og temperatur. For å ta hensyn til denne variasjonen benyttes en masterkurve for dynamisk modul. Masterkurven viser hvordan den dynamiske modulen varierer med belastningsfrekvens ved en referansetemperatur eller med temperatur ved en referansefrekvens.

Masterkurven kan benyttes i beregninger knyttet til dimensjonering eller analyse av vegoverbygninger ved bruk av mekanistisk-empiriske systemer, hvor det er behov for verdier for dynamisk modul ved ulike temperaturer og belastningsfrekvenser. Masterkurven etableres basert på tids-temperatur-superposisjonsprinsippet (TTSP), som sier at temperaturens effekt på den mekaniske responsen til et viskoelastisk materiale kan representeres som et horisontalt skift langs tids- eller frekvensskalaen. Dette gjør det mulig å etablere en masterkurve som forutsier materialets oppførsel over et bredt spekter av belastningstid eller frekvens ved å bruke testdata fra ulike temperaturer og frekvenser.

Basert på resultatene fra testingen beskrevet i kapittel 4.4 ble masterkurver etablert for samtlige massetyper vist i Tabell 4.1. Masterkurvene ble utarbeidet ved bruk av sigmoidmodellen, gitt i ligning 4.6. Sigmoidmodellen har vist seg å være den mest egnete modellen for å etablere masterkurver for dynamisk modul for asfaltmasser [1].

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta - \gamma \log(f_r)}} \quad (4.6)$$

der E^* er den dynamiske modulen, δ og $\delta + \alpha$ representerer verdien av den dynamiske modulen ved henholdsvis uendelig lav og uendelig høy frekvens, β og γ er modellparametere, og f_r er den reduserte frekvensen, som definert i ligning 4.7.

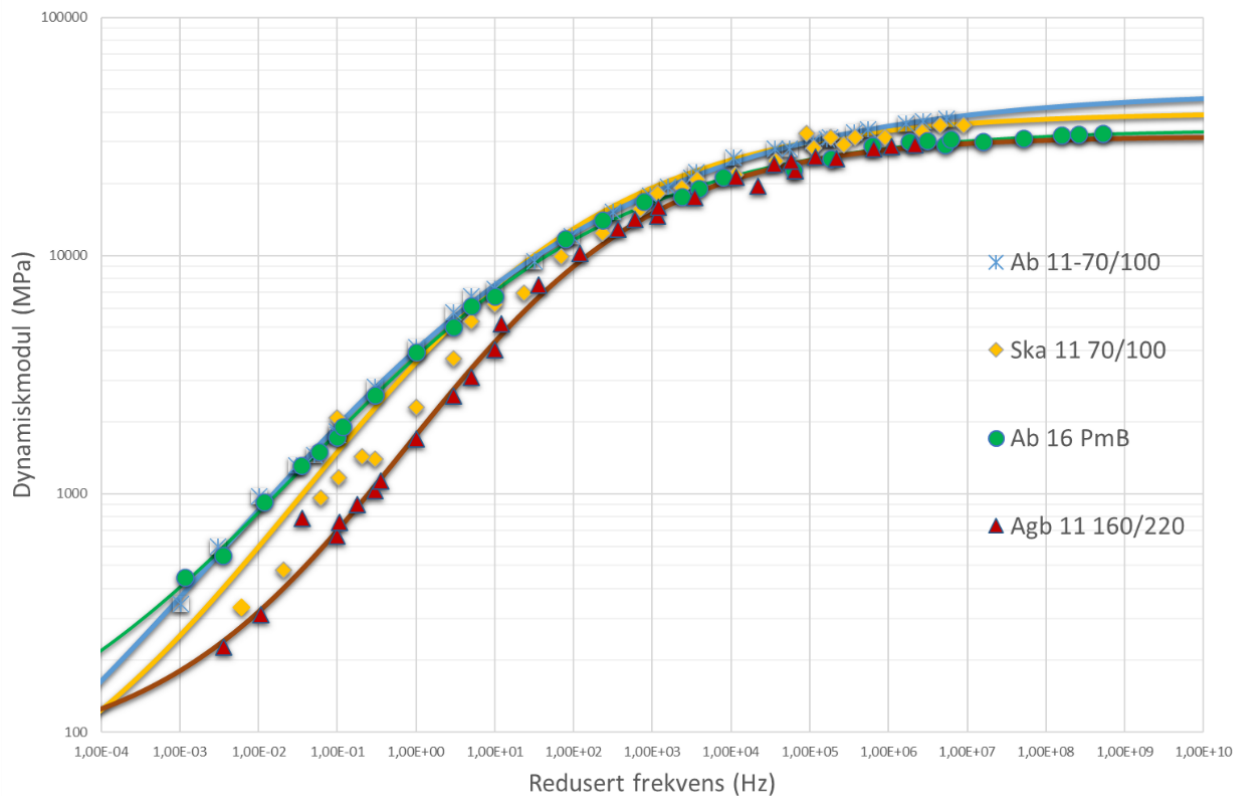
$$f_r = a_T f \quad (4.7)$$

der f er frekvensen og a_T er skiftfaktoren som beregnes ved bruk av William-Lindel-Ferry (WLF) ligningen vist i 4.8.

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T-T_r)}{C_2+(T-T_r)} \quad (4.8)$$

der T er testtemperaturen, T_r er referansetemperaturen, og C_1 og C_2 er modellparametere.

Masterkurvene ble etablert ved en referansetemperatur på 15 °C. Kombinasjonen av sigmoidmodellen og WLF-ligningen ga den best tilpassede kurven, med en R^2 -verdi på $\geq 0,973$ [1]. Parameterne for masterkurven for hver masstype ble lagt inn i materialdatabasen. Figur 4.4 viser eksempler på de etablerte masterkurvene.



Figur 4.4: Eksempel på konstituerte masterkurver

5 E-modul for ubundne materialer

5.1 Estimering av E-modul verdier for ubundne materialer

Som nevnt i kapittel 3 er stivhetsmodulen til ubundne materialer en viktig inngangsparameter i VegDim/ERAPave PP. Som beskrevet i kapittel 4 ble det utført lab-testing for å bestemme dynamiske moduler for asfaltmaterialer. For ubundne materialer, og særlig for de grove materialene som brukes i forsterkningslag og frostsikringslag, er det vanskelig å utføre lab testing for å bestemme stivhetsmodulene (E-modulene). For å estimere E-modulverdier til de ulike ubundne materialene på en fornuftig måte er det tatt følgende tilnærminger:

- Bruk av data fra tidligere forsøk, dvs. samle data fra tidligere prosjekter, studentoppgaver, PhD-arbeid osv.
- Etterregning av E-modul fra bæreevnemålinger (fallodd)
- Lab-testing av undergrunnmaterialer
- Litteratursøk for å se om det finnes noen data fra andre land

Litteratursøket viste at det ikke finnes mye studier på grove materialer, dvs. materialtypene som brukes i forsterkningslag og frostsikringslag i Norge. Det ser ut til at det ikke er så mange andre land som bruker så grove materialer til vegbyggingsformål. Grove ubundne materialer brukes i dambygging, og det finnes noen studier som fokuserer på egenskapene til disse materialene i forhold til de hovedsakelig statiske belastninger de får i en damkonstruksjon. Det finnes mange studier som har hatt søkelys på testing og modellering av ubundne bærelagsmaterialer. De fleste av disse omfatter finere materialer med maks steinstørrelse mindre enn 37,5 mm [2]. Derfor ble estimering av E-modulene i VegDim programmet gjort ved bruk av de første to overnevnte tilnærminger for de grove materialene. Unntaket er estimerer for E-modulene for leire og silt som er delvis basert på lab-testing utført på VTI i Sverige.

E-modulene til de ubundne materialene er sterkt avhengige av spenningsnivået i de lagene disse materialene brukes. I tillegg er E-modulene avhengige av fukttinnhold i materialene [3, 4, 5].

Litteratursøket viser at konklusjonene fra ulike studier ikke er entydige når det gjelder effektene av største steinstørrelse, gradering og finstoffinnhold på stivheten [3, 4, 5, 6]. Det er sannsynlig at disse faktorene har en indirekte effekt på stivheten ved å påvirke effekten av fukttinnhold [3, 4, 5, 6, 7].

I N200 Vegbygging er det beskrevet flere sorteringer av ubundne materialer ved bruk av minimum/maksimum steinstørrelser. Siden litteratursøket viser at steinstørrelse har uklar effekt på stivhet har vi valgt å bruke samme E-modulverdier for de forskjellige sorteringene av en ubunden og samme materialtype. Det betyr, for eksempel, at sorteringene kult 22/120 vil ha samme E-modulverdi som kult 22/180 og andre sorteringer av knust stein/berg som brukes i forsterkningslaget.

Følgende avsnitt gir en kort beskrivelse av arbeid som er gjort for å få på plass estimerte E-modulverdier for ubundne materialer.

5.2 Bruk av data fra tidligere forsøk

På NTNU er det utført flere lab-forsøk ifb. med masteroppgaver og PhD-studier som omfatter bestemmelse av E-moduler for ubundne materialer. For det meste er det bærelagsmaterialer, dvs. ikke så grove materialer, som er omfattet i forsøkene. Grove forsterkningslagsmaterialer ble testet av Marit Fladvad i HVS på VTI i Sverige der falloddsmålinger ble utført for å etterregne E-modulverdier [8]. I tillegg har Lisa Hannasvik utført feltforsøk der platebelastningstest og falloddsmålinger ble gjort for å bestemme E-modulverdier for forsterkningslagsmaterialene [7].

Med utgangspunkt i data fra de ulike forsøkene som var utført i regi av NTNU har Inge Hoff laget et forslag for E-modulverdier for ubundne materialer [9]. Forslaget tar hensyn til spenningsnivåer i lagene der materialene brukes. Forslaget fra Inge Hoff er vist i Tabell 5.1.

Tabell 5.1: Anbefalte E-modulverdier (fra Inge Hoff, NTNU)

Lag/materiale	Anbefalt E-modulverdi (MPa)
Ubundne bærelagsmaterialer	230
Åpengraderte forsterkningslagsmaterialer	250
Velgraderte forsterkningslagsmaterialer	150
Åpengraderte frostsikringslagsmaterialer	130
Velgraderte frostsikringslagsmaterialer	90

5.3 Etterregning av E-modulverdier fra falloddsmålinger

Falloddsmålinger ble utført på 13 referansestrekningslinjer som skal brukes til kalibrering av tilstandsutviklingsmodellene i ERAPave PP/VegDim. ViaNova har, for samtlige referansestrekningslinjer, utført etterregning av E-modulverdier for de ubundne lagene ved bruk av dataprogrammet ELMOD, og disse er rapportert i tre notater [10]. I etterregningen er E-modulene for asfaltlagene satt lik laboratoriebestemte verdier (ut fra masterkurver). Man har forsøkt å sortere materialene fra referansestrekningslinjene i forhold til materialbenevnelse/betegnelser i N200 og samle E-modulverdier, for så å regne gjennomsnittlig og median E-modulverdi for hver materialtype. Overbygningstykkelser varierer fra en referansestrekningslinje til en annen, noe som gjør at spenningen i et lag (for eksempel forsterkningslag) også vil variere fra en referansestrekningslinje til en annen. Siden E-modulene er sterkt avhengige av spenningen, vil E-modulene variere selv om det er samme materialtype som er brukt i de ulike referansestrekningslinjene.

I arbeidet med å behandle data fra referansestrekningslinjene er beregnede E-modulverdier for samme materialtype (for eksempel kult) samlet, og gjennomsnittsverdi og medianverdi beregnet uten å ta hensyn til spenningsulikheter. Dette for å få grove estimater på E-modulene. Tabell 5.2 viser etterregnede gjennomsnittlige og median E-modulverdier for materialer som er brukt i referansestrekningslinjenes vegoppbygginger.

Tabell 5.2: Gjennomsnittlige og median E-modulverdier

Lag	Materiale	E-modul (MPa)	
		Gjennomsnitt	Median
Bærelag	Knust berg (Fk)	354	394
	Knust asfalt (Ak)	341	306*
Forsterkningslag	Kult	242	253
	Kult + forkiling Fk	258	255
Frostsikringslag	Sprengt berg/sprengt stein/steinfylling	221	247
	Samfengt knustberg	194	146

NB: * Bare tre datapunkter

Marit Fladvad utførte HVS-testing av vegoverbygninger som omfattet to typer forsterkningslagsmaterialer (0/90 og 22/90). Falloddsmålinger ble gjort på vegoverbygningene ved varierende vanninnhold i materialene og måleresultatene ble brukt til å etterregne E-modul for de ubundne lagene [8]. E-modul for asfaltlaget ble estimert ved bruk av en modell som er lagt inn i ERAPave PP ved 10 °C. Resultat fra etterregningen er vist i Tabell 5.3.

Tabell 5.3: Etterregnede E-modulverdier fra HVS testing [6]

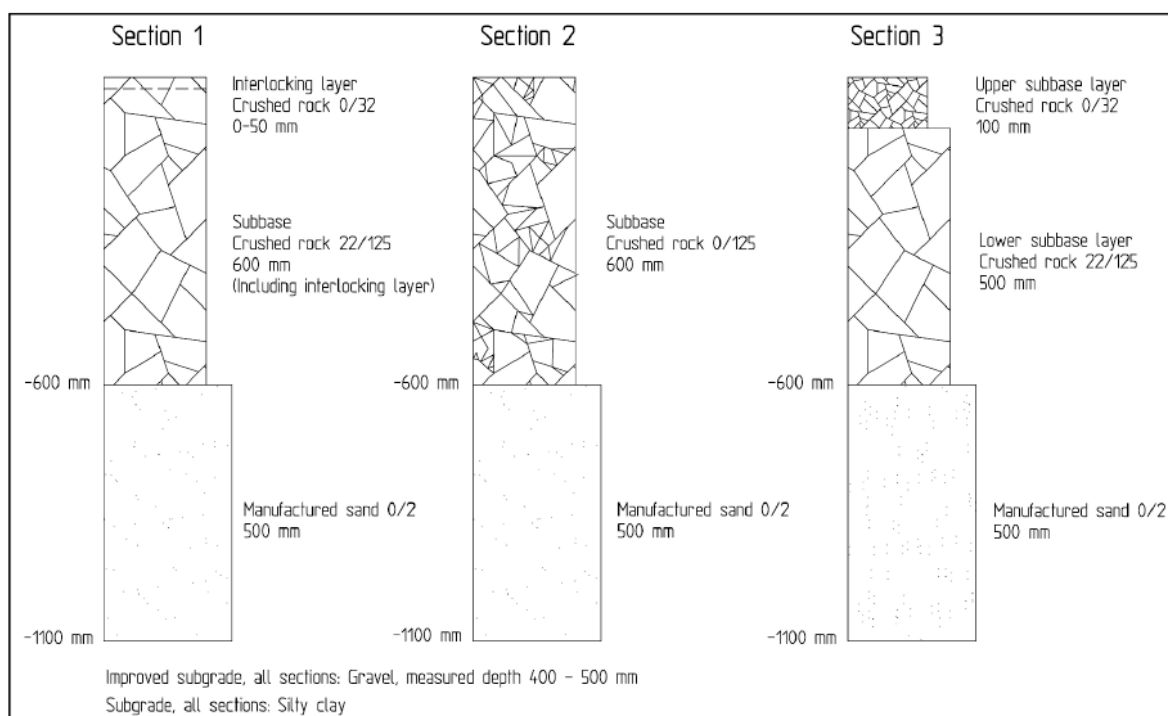
	0/90 mm structure				22/90 mm structure			
	Thickness [mm]	Stiffness modulus [MPa]			Thickness [mm]	Stiffness modulus [MPa]		
		w1	w2	w3		w1	w2	w3
AC layers	104	6500	6500	5671	112	6500	6500	5671
Unbound base	101	250	225	203	121	250	250	203
Subbase 1	163	220	157	149	150	143	143	135
Subbase 2	150	220	143	129	150	143	143	135
Subbase 3	50	220	129	116	50	143	143	135
Subgrade 1	300	82	66	46	300	82	66	46
Subgrade 2	2132	82	53	46	2117	82	53	46

Resultat fra feltforsøk utført av Lisa Hannasvik er vist i Tabell 5.4 [7]. Feltforsøket omfattet tre felt med ulik oppbygging som vist i Figur 5.1 (Section 1, Section 2 og Section 3).

Forsterkningslagsmaterialet i feltene 1 og 3 (Section 1 og Section 3) består av Kult 22/125 med forkiling med Fk 0/32 (50 mm i felt 1 og 100 mm i felt 3). Resultatet antyder at forkilingen påvirker stivheten til forsterkningslaget.

Tabell 5.4: Resultat fra feltforsøk utført av Lisa Hannasvik

Felt	E-modul fra fallodd (MP)	E-modul fra platebelastning (MPa)	
		300mm-plate	600mm-plate
Section 1	166	150	132
Section 2	133	173	149
Section 3	158	178	177



Figur 5.1: Oppbygging av forsøksfelt [5]

I VegDim-prosjektet har man utført etterregninger av E-moduler fra gamle falloddsmålinger ved bruk av ELMOD. Disse falloddsmålingene ble gjort i forbindelse med forsterkningsarbeider og mangler fullstendig informasjon om materialtype i undergrunnen. I disse etterregningene varierte også E-modulen for asfaltlagene, dvs. at resultatene ikke er sammenlignbare med resultater fra referansestrekningene, der E-modulen for asfalt var satt lik laboratoriebestemte verdier. Tabell 5.5 viser en oppsummering av resultatene fra disse etterregningene.

Tabell 5.5: Resultater fra etterregning av E-moduler fra gamle falloddsmålinger (MPa)

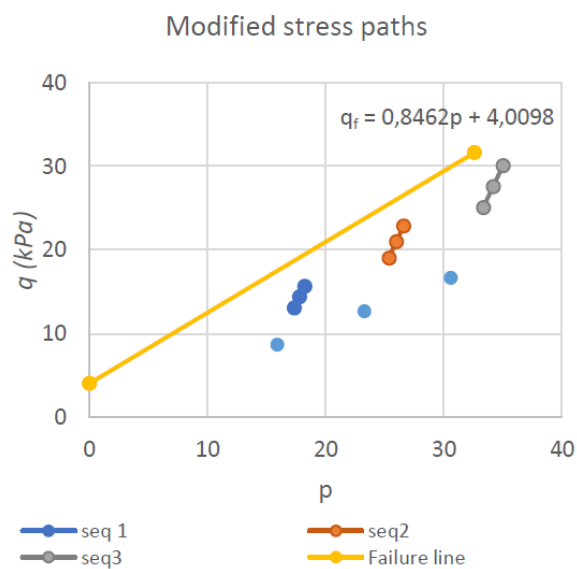
Veg	KM	Måledato	Forsterkningslag		Frostsikringslag		Undergrunn	
			Materiale	E-modul	Materiale	E-modul	Materiale	E-modul
E16	Hp 11, 0-9474	5. mai 2020	Kult 22/120	160-294	Knust fjell	130-154	Ukjent	95-210
E6	Hp 6, 0-1750	22. okt 2018	Grus og grus m/stein	139-255	Steinfylling/sprengt stein	96-198	Ukjent	72-91
E6	Hp 6, 1750-7800	17. sept 2019	Grus og knust grus	175-291	Steinfylling/sprengt stein	100-167	Ukjent	34 - 72

5.4 Resultater fra lab-testing av undergrunnsmaterialer

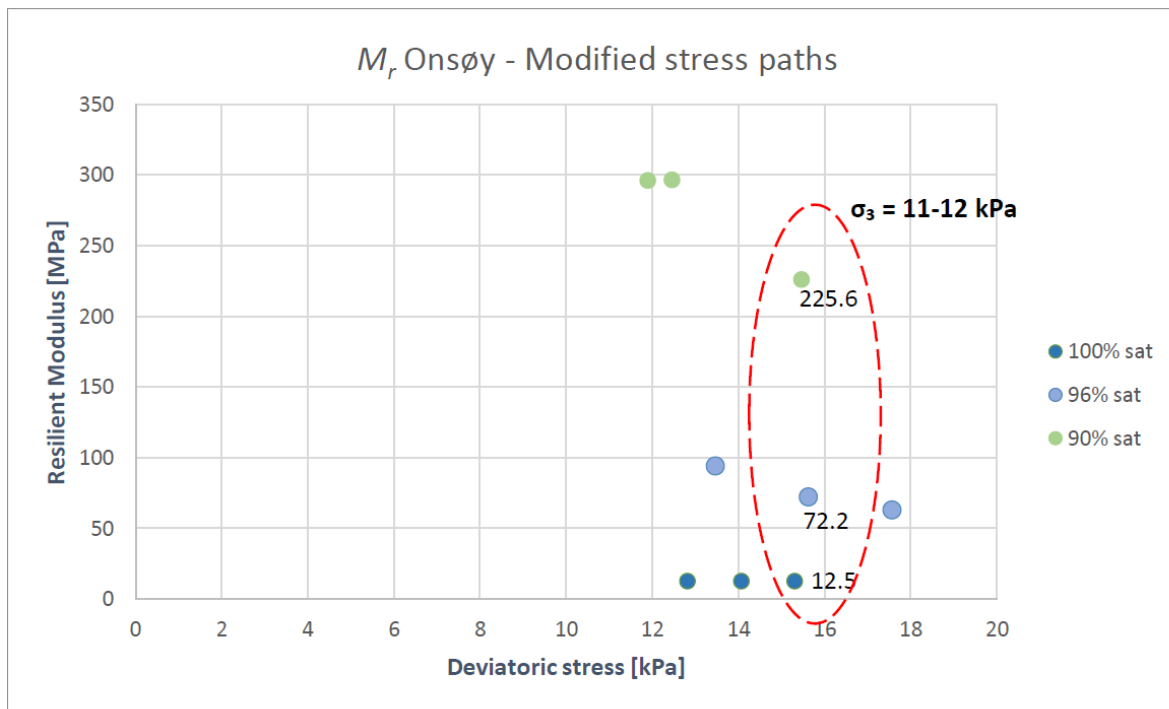
Prøver av marin leire fra Onsøy og silt fra Halden ble tatt ut og sendt til VTI for testing. Disse materialene var fra NGTS (Norwegian Geo-Test Sites) forsøksfelt, slik at en del av de geotekniske egenskapene til disse materialene er kjent fra før.

Ved sitt naturlige vanninnhold på 69 % var leiren 100 % mettet. Leireprøvene var uforstyrret. Det var planlagt å bruke AASHTO standard i gjennomføring av testingen, men det viste seg at leiren var for svak, dvs. spenningsnivåene som er fastsatt i standarden er høyere enn bruddspenningen for materialet. Derfor ble testingen utført med et modifisert opplegg basert på estimerte spenningsnivåer i undergrunnsmaterialet som vist i figur 5.2. Spenningsnivåene var estimert ved bruk av ERAPave PP. Resultat fra testingen er vist i Figur 5.3. Resultatet viser at E-modulen til leirematerialet er veldig følsom for endringer i metningsgraden (vanninnhold) og gjennomsnittlig E-modul ved høy metningsgrad (naturlig vanninnhold) er på ca. 40 MPa.

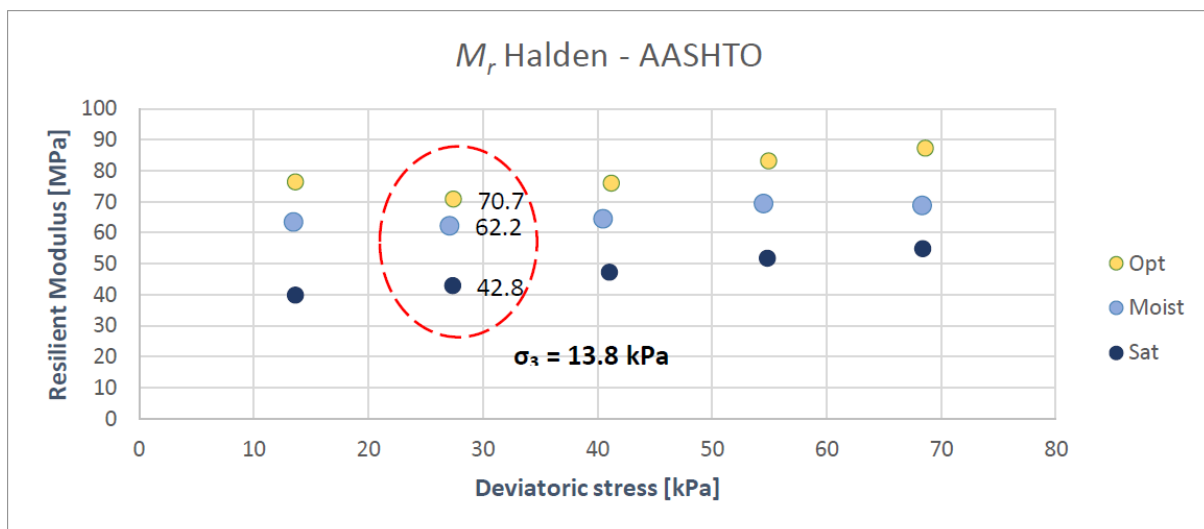
Forstyrrede prøver av silt var tatt fra Halden NGTS forsøksfelt. Naturlig vanninnhold for dette materialet er 30 %. Spenningsnivået fra AASHTO teststandard ble for høyt også for silt- materialet ved naturlig vanninnhold/metningsgrad. Derfor ble omformede prøver med redusert vanninnhold testet i henhold til AASHTO standarden. Figur 5.4 viser test-resultatet. Resultatet viser at gjennomsnittlig E-modulen for silt-materialet ved høyt vanninnhold er på ca.52 MPa.



Figur 5.2: Spenningstilstand brukt i testing av leire



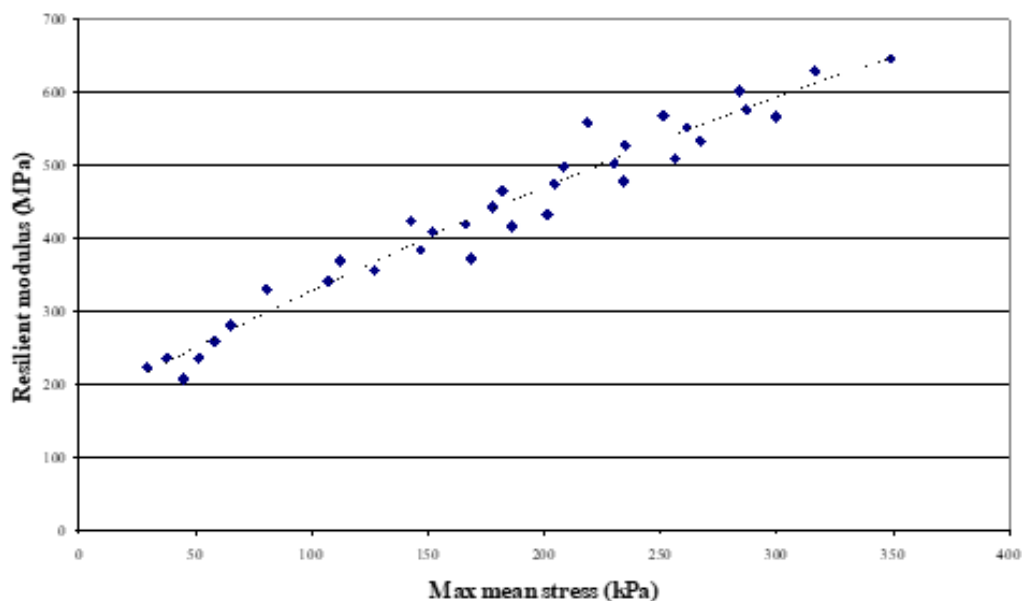
Figur 5.3: Resultat fra testing av Onsøy-leire



Figur 5.4: Resultat fra testing av Halden-silt

5.5 Estimerte E-modulverdier for ubundne materialer

Med utgangspunkt i etterregnede E-modulverdier fra falloddsmålinger, innspill fra Inge Hoff basert på tidligere forsøk, og ved bruk av ingeniørmessig skjønn har man estimert E-modulverdier for ubundne materialer som brukes i de ulike lagene i vegoverbygninger. Spenningsavhengigheten av E-modulen til bundne materialer er lagt til grunn i estimeringen. I denne sammenhengen ble Figur 5.5 [9] og lignende resultater fra litteraturen [11, 12, 13, 14] brukt.



Figur 5.5: Resultater fra treaksialtesting av ubundne bærelagsmaterialer [9]

For undergrunnmaterialer er estimatene basert på resultat fra lab-testing. Disse verdiene er lagt inn i materialdatabasen i ERAPave PP og VegDim, og skal brukes i dimensjonering av vegoverbygninger i tilfeller der man ikke har egne og spesifikke materialdata. Verdiene gjelder ved naturlig vanninnhold/metningsgrad. Variasjon av E-moduler ved vanninnhold modelleres i VegDim/ERAPave PP.

Estimerte E-modulverdier for ubundne materialer er gitt i tabellene 5.6, 5.7, 5.8, og 5.9.

Tabell 5.6: Estimerte E-modulverdier for bærelagsmaterialer

Materiale	Estimert E-modul (MPa)
Ak 0/11 (bærelag og forkiling)	350
Ak 0/16	350
Ak 0/22	350
Ak 0/32	350
Gk 0/22	300
Gk 0/32	300
Gk 0/45	300
Gk 0/63	300
Knust slagg 0/22	200
Knust slagg 0/32	200
Knust slagg 0/45	200
Knust slagg 0/63	200
Fk 0/22	300
Fk 0/32	300
Fk 0/45	300
Fk 0/63	300
Fp 32	300
Fp 45	300
Knust betong Gjb I 0/22	300
Knust betong Gjb I 0/32	300

Knust betong Gjb I 0/45	300
Knust betong Gjb I 0/63	300
Resirkulerte materialer Gjn 0/22	200
Resirkulerte materialer Gjn 0/32	200
Resirkulerte materialer Gjn 0/45	200
Resirkulerte materialer Gjn 0/63	200
Emulsjonsgrus (Eg) (forkiling)	Ukjent
Skumgrus (forkiling)	Ukjent
Bitumenstabilisert grus (Bsg)	Ukjent
Bitumenanriket grus (Bag)	Ukjent

Tabell 5.7: Estimerte E-modulverdier for forsterkningslagsmaterialer

Materiale	Estimert E-modul (MPa)
Pukk 11/90	250
Pukk 16/90	250
Kult 22/125	250
Kult 22/180	250
Samfengt 0/63	200
Samfengt 0/90	200
Samfengt 0/125	200
Samfengt 0/180	200
Slagg i forsterkningslag	150
Knust betong Gjb I i forsterkningslag	250
Knust betong Gjb II i forsterkningslag	200
Oppgravingsmasse og overskuddsmasse Gjn i forsterkningslag	200

Tabell 5.8: Estimerte E-modulverdier for frostsikringslagsmaterialer

Materiale	Estimert E-modul (MPa)
Løsmasser	100
Knust berg i frostsikringslag	150
Oppgravingsmasse og overskuddsmasse Gjn i frostsikringslag	100
Lettklinker	100
Skumglass	100
Slagg i frostsikringslag	100
Knust betong Gjb I i frostsikringslag	150
Knust betong Gjb II i frostsikringslag	100

Tabell 5.9: Estimerte E-modulverdier for undergrunn

Materiale	Estimert E-modul (MPa)
Steinfylling i undergrunn	150
Sprengt berg i undergrunn	150
Grus i undergrunn	100
Sand	80
Silt	50
Leire	40

6 Referanser

1. Chen, H., Saba, R.G., Liu G., Barbieri, D.M., Zhang, X. & Hoff, I. (2023), Influence of material factors on the determination of dynamic moduli and associated prediction models for different types of asphalt mixtures, *Construction and Building Materials* 365 (2023) 130134.
2. CEN (2018), EN 12697-26 Bituminous mixtures, Test methods, Part 26 Stiffness.
3. Lekarp, F., Isacsson, I. & Dawson, A. State of the art - I: Resilient Response of Unbound Aggregates, *Journal of Transportation Engineering* · January 2000, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X (2000)126:1(66).
4. Tamrakar, P. & Nazarian, S. (2016), Impact of Gradation and Moisture Content on Stiffness Parameters of Base Materials, University of Texas at El Paso, CAIT-UTC-054
5. Ullah, S., Jamal, A., Almoshaogeh, M., Alharbi, F., Hussain, J. Investigation of Resilience Characteristics of Unbound Granular Materials for Sustainable Pavements. *Sustainability* 2022, 14, 6874. <https://doi.org/10.3390/su14116874>
6. Qi, S., Cui, Y., Dupla, J., Chen, R., Wang, H., Su, Y., Lamas-Lopez, F., & Canou, J. (2020). Investigation of the parallel gradation method based on the response of track-bed materials under cyclic loadings, *Elsevier*, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100360>
7. Hannasvik, L. T., Kierstein, R., Johansen, J.M., Evensen, R. & Hoff, I. (2024), Stiffness of coarse unbound granular material used in road construction. *Transportation geotechnics* 46 (2024) 101271
8. Fladvad, M., Erlingsson, S. (2020). Performance of Unbound Pavement Materials in Changing Moisture Conditions. In: Chabot, A., Hornych, P., Harvey, J., Loria-Salazar, L. (eds) *Accelerated Pavement Testing to Transport Infrastructure Innovation. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 96. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55236-7_8
9. Hoff, I. (2023). Design parameters for Norwegian unbound granular materials based on laboratory testing, upublisert notat.
10. Johansen, J.M., Holen, Å. & Evensen, R. (2022 – 2023). Kalibrering av ERAPave PP: bestemmelse av E-modul fra nedbøyningsmålinger, 3 upubliserte notater.
11. Arm, M. (2003). Mechanical Properties of Residues as Unbound Road Materials - experimental tests on MSWI bottom ash, crushed concrete and blast furnace slag, Doctoral thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm.
12. Watn, A., Hoff, I., Amundsgård, K.O., & Emdal, A. (2000). Light-weight fill aggregates for insulation in roads-strength and stiffness properties, NGM – 2000, Helsinki.
13. Aurstad, J., Dahlhaug, J.E., & Berntsen, G. (2009). Unbound crushed concrete in high volume roads – Evaluation of field behavior and structural performance, *Proceedings of BCR2A-2009 conference*, Urbana Champaign, USA
14. Akbas, M., Ozaslan, B., Iyisan, R., (2023). Utilization of recycled concrete aggregates for developing high-performance and durable flexible pavements, *Construction and Building Materials* 407(2023) 133479.

7 Vedlegg

7.1 Skjema for innsamling av informasjon om mest brukte materialer i vegbygging og vedlikehold

Ranger materialene i forhold til bruk (1 mest brukt, 2 nest mest brukt, osv.) i deres region. Legg til i tabellen hvis dere bruker noen andre materialer enn de som står på lista. Stryk materialer som ikke er i bruk i deres region.

1. Dekkematerialer

Massetyper	Steinstørrelse	Rangering			
		Høytrafikkerte veger		Lavtrafikkerte veger	
		Slitelag	Bindlag	Slitelag	Bindlag
Ab	16				
	11				
	8				
	4				
Ska	16				
	11				
	8				
Agb	16				
	11				
	8				
Ma	16				
	11				
	8				
Andre					

2. Bindemidler

Bindemiddeltypen	Rangering	
	Høytrafikkerte veger	Lavtrafikkerte veger
PmB		
70/100		
100/150		
160/220		
V1500		
V3000		
V6000		
V12000		
Andre		

3. Bærelagsmaterialer

Materialtyper	Steinstørrelse	Rangering			
		Høytrafikkerte veger		Lavtrafikkerte veger	
		Øvre bærelag	Nedre bærelag	Øvre bærelag	Nedre bærelag
Ag	22				
	16				
	11				
	8				
Ap	22				
	16				
	11				
Pp	16/32				
	22/45				
Eg	22				
	16				
Sg					
Bg					
Bag					
Gk					
Fk	0/32				
	0/45				
	0/63				
Gjb					
Andre					

4. Forsterkningslagsmaterialer

Materialtyper	Steinstørrelse	Rangering	
		Høytrafikkerte veger	Lavtrafikkerte veger
Kult	22/125		
	22/180		
Pukk	11/90		
	16/90		
Samfengt knust berg	0/63		
	0/90		
Grus	0/63		
	0/90		
Resirkulerte materialer	0/63		
	0/90		
	0/125		
	22/125		
	11/90		
	16/90		
Andre			

5. Frostsikringslagsmaterialer

Materialtyper	Rangering	
	Høytrafikkerte veger	Lavtrafikkerte veger
Sand		
Grus		
Knust berg		
Andre		

7.2 Sammendrag av svar fra regioner

Slitelag, høy trafikk

Region	1	2	3	4	5	6
RN	Ab 16	Ska 16	Ab 11	Ska 11	Ag b16	Steindekker
RM	Ska 16	Ska 11	Ab 11	(Agb 11 sjeldent benyttet)		
RS	Ab 16	Ab 11	Ska 16	Ska 11		
RØ	Ska+Ab 16	Ab 11				
RV	Ab 16	Ab 11	Ska 11	Ska 16		

Slitelag, lav trafikk

Region	1	2	3	4	5	6
RN	Agb 16	Agb 11	Ma 16	Ma 11	Ab 11	Ska 11
RM	Agb 11	Ab 11	Agb 16	(Agb 8 på G/S- veg)	Ma 11	
RS	Ab 16	Agb 11				
RØ	Agb 11/8	Ab 11	Ma 11/ 16			
RV	Agb 11	Agb 16	Ab 16	Ab 11		

Bindlag, høy trafikk

Region	1	2	3	4	5
RN	Ab 11	Agb 11	Ab 16	Agb 16	Ska 11
RM	Ab 11	Ska 11	Ska 16	Agb 11	
RS	Ab 16	Ab 11			
RØ	Ska og Ab 16	Ab 11			
RV	Ab 11	Ab 16			

Bindlag, lav trafikk

Region	1	2	3	4	5
RN	Agb 11	Ab 11			
RM	Agb 11	Ab 11	Agb 16	Agb 8	Ma 11
RS	Agb 16	Ab 16			
RØ	Agb 11	Ab 11	Agb 8		
RV	Agb 11	Agb 16			

Bærelag øvre, høy trafikk

Region	1	2	3	4
RN	Ag 16	Ag 22	Fk 0/8 steindekker	(settelag fast)?
RM	Ag 16			
RS	Ag 16	Ag 22		
RØ	Ag 16	Ag 11	Ap 16	
RV	Ag 16			

Bærelag nedre, høy trafikk

Region	1	2	3	4	5
RN	Ag 16	Ag 22	Ak	Da (steindekker)?	Db (steindekker)?
RM	Ag 16	Ap 16	Ap 22		
RS	Ag 16	Ag 22			
RØ	Ag 16	Ag 11	Ap 16		
RV	Ag 16				

Bærelag øvre, lav trafikk

Region	1	2	3	4	5	6
RN	Ag 16	Ag 22	Fk 0/32	Bg?	Pp 16/32	Pp 22/45
RM	Fk 0/32	Ag 16	Fk 0/45			
RS	Ag 16	Ag 22				
RØ	Fk 0/32	Ag 16	Ap 16			
RV	Ag 16					

Bærelag nedre, lav trafikk

Region	1	2	3	4	5
RN	Fk 0/32	Ak	Ag 16	Ag 22	Gk
RM	Fk 0/32	Ag 16	Fk 0/45		Fk 22/63?
RS	Fk 0/32	Ak	Ag 16		
RØ	Fk 0/32	Ag 16	Ap 16		
RV	Fk 0/32	Ak	Ag 16	Fk 0/63	

Forsterkningslag, høy trafikk

Region	1	2	3	4	5
RN	Kult 22/125	Pukk 11/90	Samfengt knust berg 0/90	Pukk 16/90	Samfengt knust berg 0/63
RM	Kult 22/125	Kult 22/180			
RS	Kult 22/125	Samfengt knust berg 0/90	Kult 22/180		
RØ	Kult 22/125		Pukk 11/90		
RV	Kult 22/125	Pukk 11/90			

Forsterkningslag, lav trafikk

Region	1	2	3	4	5
RN	Kult 22/125	Pukk 11/90	Samfengt knust berg 0/90	Pukk 16/90	Samfengt knust berg 0/63
RM	Kult 22/125	(Samfengt kunst berg 0/90 G/S-veg)	Kult 22/180	Pukk 22/63	
RS	Kult 22/125	Samfengt kunst berg 0/90	Kult 22/180		
RØ	Kult 22/125	Pukk 11/90+Grus 0/90			
RV	Kult 22/125	Pukk 11/90	Samfengt knust berg 0/63	Samfengt knust berg 0/90	Resirkulerte materialer 0/90

Frostsikringslag, høy trafikk

Region	1	2	3	4	5	6
RN	Knust berg	Skumglass	Grus	XPS	Sand	Lettklinker
RM	Knust berg	Grus	(noe XPS og skumglass)			
RS	Knust berg	Sand	XPS/lettklinker/skumglass			
RØ	Knust berg	Sand/Grus	XPS/lettklinker/skumglass			
RV	Knust berg	Masseutskiftning med stedlige T2 masser/sprengstein iht. tabell 521.2, N200	Kult			

Frostsikringslag, lav trafikk

Region	1*	2	3	4	5	6
RN	Knust berg	Skumglass	Grus	XPS	Sand	Lettklinker
RM	(sjelden, uspesifikt)					
RS	Knust berg	Sand	XPS/lettklinker/skumglass			
RØ	(sjelden)					
RV	Masseutskiftning med stedlige T2 masser/sprengstein iht. tabell 521.2, N200	Knust berg	Kult			

*Sjelden frostsikring på lavtrafikkert veg med ÅDT<1500, men knust berg brukes hvis behov, ellers blir det masseutskiftning hvis vannømfintlig materiale

Bindemidler, høy trafikk

Region	1	2	3	4
RN	160/220	330/430 for Ag	50/70	PMB
RM	PMB	70/100		
RS	70/100	PMB		
RØ	PMB+70/100			
RV	70/100	PMB		

Bindemidler, lav trafikk

Region	1	2	3	4
RN	160/220	330/430 for Ag	V6000	V12000
RM	160/220	V12000		
RS	70/100	100/150		
RØ	70/100+V12000	160/220		
RV	160/220	70/100		



Statens vegvesen
Pb. 1010 Nordre Ål
2605 Lillehammer

Tlf: (+47) 22 07 30 00

firmapost@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Tryggere, enklere og grønnere reisehverdag